



# HIDRÁULICA DE TUBERÍAS

Juan H. Cadavid R.

ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS  
E INGENIERÍAS

COLECCIÓN ACADÉMICA



# Hidráulica de tuberías

---

Juan H. Cadavid R.



Cadavid Restrepo, Juan H.

Hidráulica de tuberías / Juan H. Cadavid R. – Medellín : Editorial EAFIT, 2023.

518 p. ; 21 cm. -- (Académica).

ISBN 978-958-720-828-3

ISBN 978-958-720-829-0 (versión EPUB)

1. Hidráulica. 2. Ingeniería hidráulica. I. Tít. II. Serie

627 cd 23 ed.

C121

Universidad EAFIT - Centro Cultural Biblioteca Luis Echavarría Villegas

## Hidráulica de tuberías

Primera edición: marzo de 2023

© Juan H. Cadavid R.

© Editorial EAFIT

Carrera 49 No. 7 sur - 50

Tel.: 604 261 95 23, Medellín

<http://www.eafit.edu.co/fondoeditorial>

<https://editorial.eafit.edu.co/index.php/editorial>

Correo: [fonedit@eafit.edu.co](mailto:fonedit@eafit.edu.co)

ISBN 978-958-720-828-3

ISBN 978-958-720-829-0 (versión EPUB)

DOI: <https://doi.org/10.17230/9789587208283lr0>

Imagen de carátula: Macrovector - Freepik.com

Universidad EAFIT | Vigilada Mineducación Reconocimiento como Universidad: Decreto Número 759, del 6 de mayo de 1971, de la Presidencia de la República de Colombia. Reconocimiento personería jurídica: Número 75, del 28 de junio de 1960, expedida por la Gobernación de Antioquia. Acreditada institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional hasta el 2026, mediante Resolución 2158 emitida el 13 de febrero de 2018

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de la editorial

Editado en Medellín, Colombia

# Tabla de Contenido

<b>1. Hidráulica de tuberías</b>	<b>6</b>
1.1. Introducción . . . . .	6
1.2. Necesidad de la hidráulica . . . . .	6
1.2.1. Mecánica de fluidos . . . . .	6
1.2.2. Hidráulica . . . . .	9
1.2.2.1. Ingeniería hidráulica . . . . .	9
1.2.2.2. El método de la hidráulica . . . . .	9
1.2.3. División de la hidráulica . . . . .	10
1.2.3.1. Definición de conducción . . . . .	11
1.2.3.1.1. Conducción cerrada. . . . .	11
1.2.3.1.2. Conducción abierta. . . . .	11
1.2.3.2. Tipos de flujo . . . . .	11
1.2.3.2.1. Flujo a presión. . . . .	11
1.2.3.2.2. Flujo a superficie libre. . . . .	11
1.2.3.3. Funcionamiento de conducciones abiertas y cerradas . . . . .	12
1.2.4. Hidráulica de canales . . . . .	14

1.2.5.	Hidráulica de tuberías . . . . .	14
1.2.6.	Cinemática básica del flujo en canales y tuberías . . . . .	15
<b>2.</b>	<b>Principio de conservación de la energía</b>	<b>17</b>
2.1.	Introducción . . . . .	17
2.2.	Principio de conservación de la energía . . . . .	18
2.2.1.	Teorema de Bernoulli . . . . .	18
2.2.2.	Formulación del principio de conservación de la energía . . . . .	20
2.2.2.1.	Líneas de energía y piezométrica . . . . .	20
2.2.2.1.1.	Líneas de energía. . . . .	21
2.2.2.1.2.	Línea piezométrica. . . . .	21
2.2.2.1.3.	Gradiente hidráulico. . . . .	22
2.2.3.	Estudio de la pérdida de energía en líquidos . . . . .	23
2.3.	Potencia hidráulica . . . . .	26
<b>3.</b>	<b>Cálculo de la pérdida por fricción</b>	<b>28</b>
3.1.	Introducción . . . . .	28
3.2.	Ecuación de Darcy-Weisbach . . . . .	29
3.2.1.	Hipótesis . . . . .	29
3.2.2.	Deducción . . . . .	30
3.2.3.	Ecuación de Darcy para una tubería . . . . .	38
3.2.4.	Interpretación e implicaciones del resultado de Darcy . . . . .	39
3.3.	Aspectos fundamentales del factor de fricción . . . . .	42

3.3.1.	Dependencia funcional del factor de fricción . . . . .	45
3.3.2.	Capa límite en tuberías . . . . .	48
3.3.2.1.	Introducción . . . . .	48
3.3.2.2.	Modelos del flujo . . . . .	49
3.3.2.2.1.	Campo de flujo. . . . .	49
3.3.2.2.2.	Flujo laminar. . . . .	50
3.3.2.2.3.	Flujo turbulento. . . . .	51
3.3.2.3.	Desarrollo de una capa límite en una tubería . . . . .	51
3.3.2.4.	Subcapa laminar . . . . .	55
3.3.2.4.1.	Distribución de velocidades dentro de la subcapa laminar. . . . .	56
3.3.2.4.2.	Evaluación del espesor de la subcapa laminar. . . . .	57
3.3.3.	Distribución de la tensión de corte en una tubería . . . . .	58
<b>4.</b>	<b>Cálculo del factor de fricción</b>	<b>60</b>
4.1.	Introducción . . . . .	60
4.2.	Cálculo del factor de fricción en flujo laminar . . . . .	61
4.2.1.	Distribución de velocidad en una tubería con flujo laminar . . . . .	61
4.2.2.	Ecuación del factor de fricción en flujo laminar . . . . .	63
4.3.	Cálculo del factor de fricción en flujo turbulento . . . . .	64
4.3.1.	Distribución de velocidades en flujo turbulento . . . . .	64
4.3.1.1.	Hipótesis de la longitud de mezcla (Prandtl) . . . . .	66
4.3.1.2.	Una integración aproximada . . . . .	69

4.3.2.	Cálculo del factor de fricción con superficie hidráulicamente lisa . . . . .	70
4.3.2.1.	Distribución de velocidades en tubería lisa . . . . .	70
4.3.2.2.	Velocidad máxima . . . . .	75
4.3.2.3.	Velocidad promedia . . . . .	75
4.3.2.4.	Ecuación del factor de fricción . . . . .	81
4.3.3.	Factor de fricción con superficie hidráulicamente rugosa . . . . .	82
4.3.3.1.	Distribución de velocidades en una tubería rugosa . . . . .	82
4.3.3.2.	Velocidad promedia . . . . .	83
4.3.3.3.	Ecuación del factor de fricción . . . . .	84
4.3.4.	Trabajo experimental de Nikuradse . . . . .	85
4.3.4.1.	Condiciones del experimento . . . . .	85
4.3.4.2.	Resultados del experimento . . . . .	86
4.3.5.	Factor de fricción en tuberías comerciales . . . . .	88
4.3.5.1.	Rugosidad absoluta en las tuberías comerciales . . . . .	88
4.3.5.2.	Ecuación de Colebrook-White . . . . .	89
4.4.	Diagrama de Moody . . . . .	93
4.5.	Ejemplos . . . . .	96
4.5.1.	Ejemplo 1 . . . . .	97
4.5.1.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	97
4.5.1.2.	Método de solución . . . . .	97
4.5.1.3.	Solución numérica . . . . .	99
4.5.2.	Ejemplo 2 . . . . .	100

4.5.2.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	100
4.5.2.2.	Método de solución . . . . .	101
4.5.2.3.	Solución numérica . . . . .	102
4.5.3.	Ejemplo 3 . . . . .	104
4.5.3.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	105
4.5.3.2.	Método de solución . . . . .	105
4.5.4.	Ejemplo 4 . . . . .	107
4.5.4.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	108
4.5.4.2.	Método de solución . . . . .	108
4.5.4.3.	Solución numérica . . . . .	111
4.6.	Ejercicios propuestos . . . . .	113
4.6.1.	Ejercicio 1 . . . . .	113
4.6.2.	Ejercicio 2 . . . . .	113
4.6.3.	Ejercicio 3 . . . . .	113
4.6.4.	Ejercicio 4 . . . . .	114
4.6.5.	Ejercicio 5 . . . . .	114
4.6.6.	Ejercicio 6 . . . . .	114
4.6.7.	Ejercicio 7 . . . . .	115
4.6.8.	Ejercicio 8 . . . . .	115
4.6.9.	Ejercicio 9 . . . . .	115

**5. Elementos de diseño de tuberías**

**116**

5.1.	Introducción . . . . .	116
5.2.	Coeficiente de Coriolis . . . . .	117
5.2.1.	Introducción . . . . .	117
5.2.2.	Coeficiente de Coriolis en flujo laminar . . . . .	117
5.2.3.	Coeficiente de Coriolis en flujo turbulento . . . . .	119
5.3.	Resistencia por efecto de la fricción en tuberías . . . . .	126
5.4.	La influencia del diámetro en el diseño hidráulico . . . . .	127
5.4.1.	La carga de presión y el funcionamiento de una tubería . . . . .	128
5.4.1.1.	Evolución de carga de presión en una tubería . . . . .	128
5.4.1.2.	Influencia de la carga de presión en el funcionamiento de una tubería	130
5.5.	Condiciones reales de diseño . . . . .	135
5.5.1.	Consideraciones en cuanto al diámetro . . . . .	135
5.5.2.	Consideraciones en cuanto al factor de fricción . . . . .	137
5.5.2.1.	Valores esperables del número de Reynolds límite según el material	137
5.5.2.2.	Comportamiento del rango del factor de fricción según el material .	139
5.5.3.	Consideraciones en cuanto al coeficiente de Coriolis . . . . .	140
5.5.3.1.	Comportamiento práctico de la carga de velocidad . . . . .	141
<b>6.</b>	<b>Cálculo de la pérdida por forma</b>	<b>146</b>
6.1.	Introducción . . . . .	146
6.2.	Pérdida local de carga . . . . .	147
6.3.	Mecanismo físico de la pérdida local de carga . . . . .	147

6.3.1.	Desprendimiento de la capa límite . . . . .	147
6.3.2.	Flujo principal y flujo secundario . . . . .	148
6.3.3.	Elementos inductores de pérdidas locales . . . . .	149
6.4.	Ecuación para el cálculo de pérdidas locales . . . . .	150
6.4.1.	Pérdida local total . . . . .	151
6.4.2.	Coefficiente global de pérdida local . . . . .	151
6.5.	Pérdida local y líneas de energía . . . . .	155
6.6.	Evaluación de la resistencia total a fluir en una tubería . . . . .	156
6.7.	Introducción al problema del tubo simple . . . . .	157
6.7.1.	Condiciones de borde en tuberías . . . . .	158
6.7.2.	Salto bruto . . . . .	159
6.7.3.	Salto neto . . . . .	161
6.7.4.	Solución para el problema del tubo simple . . . . .	162
6.7.4.1.	Tubo simple con flujo laminar . . . . .	163
6.7.4.2.	Tubo simple con flujo turbulento y superficie hidráulicamente lisa .	164
6.7.4.3.	Tubo simple con flujo turbulento y superficie hidráulicamente rugosa	165
6.7.4.4.	Tubo simple con flujo turbulento en tubo comercial . . . . .	166
6.8.	Ejemplos . . . . .	167
6.8.1.	Ejemplo 1 . . . . .	167
6.8.1.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	167
6.8.1.2.	Método de solución . . . . .	167
6.8.1.3.	Solución numérica . . . . .	168

6.8.2.	Ejemplo 2 . . . . .	170
6.8.2.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	170
6.8.2.2.	Método de solución . . . . .	170
6.8.2.3.	Solución numérica . . . . .	172
6.8.3.	Ejemplo 3 . . . . .	172
6.8.3.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	173
6.8.3.2.	Método de solución . . . . .	173
6.8.3.3.	Solución numérica . . . . .	174
6.9.	Ejercicios propuestos . . . . .	175
6.9.1.	Ejercicio 1 . . . . .	175
6.9.2.	Ejercicio 2 . . . . .	175
6.9.3.	Ejercicio 3 . . . . .	175
6.9.4.	Ejercicio 4 . . . . .	176
<b>7.</b>	<b>Coefficientes de pérdida local para accesorios</b>	<b>177</b>
7.1.	Introducción . . . . .	177
7.2.	Características del coeficiente de pérdida local . . . . .	178
7.3.	Soporte documental . . . . .	178
7.4.	Alcance de este estudio . . . . .	179
7.5.	Coefficiente de pérdida por entrada y salida . . . . .	180
7.5.1.	Coefficiente de pérdida por entrada . . . . .	180
7.5.2.	Coefficiente de pérdida por salida . . . . .	183

7.6.	Coeficiente de pérdida por cambio de diámetro . . . . .	183
7.6.1.	Ecuación de Borda-Bélanger . . . . .	184
7.6.2.	Transiciones . . . . .	188
7.6.3.	Coeficiente de pérdida por cambio de diámetro según CRANE . . . . .	189
7.6.3.1.	Coeficiente de pérdida por una ampliación gradual . . . . .	189
7.6.3.2.	Coeficiente de pérdida por una reducción gradual . . . . .	189
7.6.3.3.	Observaciones . . . . .	190
7.6.3.4.	Uso práctico de las transiciones . . . . .	191
7.7.	Coeficiente de pérdida por cambio de dirección . . . . .	192
7.7.1.	Introducción . . . . .	192
7.7.2.	Coeficiente de pérdida por cambio brusco de dirección . . . . .	194
7.7.2.1.	Aspectos geométricos e hidráulicos de las uniones y bifurcaciones . . . . .	194
7.7.2.1.1.	Valor relativo de los coeficientes por bifurcación y unión. . . . .	198
7.7.2.2.	Valores prácticos para coeficientes de pérdida por accesorios <b>T</b> y <b>Y</b> . . . . .	200
7.7.2.2.1.	Accesorios <b>T</b> . . . . .	200
7.7.2.2.2.	Accesorios <b>Y</b> . . . . .	203
7.7.3.	Coeficientes de pérdida por cambios graduales de dirección . . . . .	204
7.7.3.1.	Funcionamiento hidráulico de un codo . . . . .	207
7.7.3.2.	Coeficiente de pérdida por codo . . . . .	209
7.7.3.3.	Evaluación del coeficiente de pérdida por codo según IFS . . . . .	210
7.7.4.	Coeficiente de pérdida por válvula . . . . .	216
7.7.4.1.	Introducción . . . . .	216

7.7.4.2.	Calibración de una válvula . . . . .	218
7.7.4.3.	Efecto regulador de una válvula . . . . .	219
7.7.4.4.	Algunos coeficientes de pérdida por válvula . . . . .	221
7.7.4.5.	Un método y sus limitaciones . . . . .	221
7.7.4.6.	Válvula de compuerta . . . . .	222
7.7.4.7.	Válvula de disco oscilante . . . . .	222
7.7.4.8.	Válvula de pie con obturador oscilante . . . . .	223
7.7.4.9.	Válvula de globo . . . . .	225
7.7.4.10.	Válvula de mariposa . . . . .	225
7.7.4.11.	Valores del coeficiente de válvula según CRANE . . . . .	226
7.7.4.12.	Válvula de esfera . . . . .	227
7.8.	Un método alternativo para calcular pérdidas locales . . . . .	228
7.9.	Magnitud del coeficiente global de pérdida local . . . . .	232
7.10.	Importancia relativa de las pérdidas locales . . . . .	234
7.11.	Ejemplos . . . . .	237
7.11.1.	Ejemplo 1 . . . . .	237
7.11.1.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	238
7.11.1.2.	Método de solución . . . . .	238
7.11.1.3.	Solución numérica . . . . .	239
7.11.2.	Ejemplo 2 . . . . .	241
7.11.2.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	242
7.11.2.2.	Método de solución . . . . .	242

7.11.2.3. Solución numérica . . . . .	242
7.12. Ejercicios propuestos . . . . .	245
7.12.1. Ejercicio 1 . . . . .	245
7.12.2. Ejercicio 2 . . . . .	245
7.12.3. Ejercicio 3 . . . . .	246
7.12.4. Ejercicio 4 . . . . .	246
7.12.5. Ejercicio 5 . . . . .	247
7.12.6. Ejercicio 6 . . . . .	247
<b>8. Fundamentos de máquinas hidráulicas</b>	<b>248</b>
8.1. Introducción . . . . .	248
8.2. Generalidades . . . . .	249
8.2.1. Definición de máquina . . . . .	249
8.2.2. Tipos de máquina . . . . .	249
8.2.3. Máquinas de fluido . . . . .	249
8.2.3.1. Máquinas de fluido generadoras . . . . .	251
8.2.3.2. Máquinas de fluido motoras . . . . .	251
8.2.4. Clasificación de las máquinas de fluido . . . . .	251
8.2.4.1. Máquinas térmicas . . . . .	251
8.2.4.2. Máquinas hidráulicas . . . . .	251
8.2.4.3. Máquinas de desplazamiento positivo . . . . .	252
8.2.4.4. Turbomáquinas . . . . .	253

8.3. Turbomáquinas hidráulicas . . . . .	254
8.3.1. Conceptos de potencia en turbomáquinas . . . . .	255
8.3.1.1. Distribución de la potencia en bombas . . . . .	257
8.3.1.2. Distribución de potencia en turbinas . . . . .	259
8.3.2. Conceptos de eficiencia en turbomáquinas . . . . .	259
8.3.2.1. Motobomba . . . . .	259
8.3.2.2. Turbogenerador . . . . .	260
8.3.2.3. Factores que determinan la potencia en una turbomáquina . . . . .	261
8.3.2.4. Ecuación de la eficiencia en bombas centrífugas y turbinas . . . . .	262
8.3.2.4.1. En bombas. . . . .	262
8.3.2.4.2. En turbinas. . . . .	263
8.3.3. Ecuación de Euler . . . . .	263
8.3.3.1. Grado de reacción de una máquina . . . . .	269
8.3.4. El problema del tubo simple con turbomáquinas . . . . .	270
8.3.4.1. Condición energética a la entrada de turbomáquinas . . . . .	271
8.3.4.2. Modificación del principio de conservación de la energía . . . . .	272
8.3.4.3. Influencia del grado de reacción sobre la carga de una turbomáquina	273
8.3.4.4. Planteamiento del problema del tubo simple con una turbomáquina	274
8.3.4.5. Estudio de la solución de la ecuación de energía para turbomáqui- nas . . . . .	280
8.3.4.6. Algunos problemas típicos de tubo simple con turbomáquinas . . . . .	283
8.4. Ejemplos . . . . .	284

8.4.1.	Ejemplo 1	284
8.4.1.1.	Condiciones y suposiciones	284
8.4.1.2.	Método de solución	284
8.4.1.3.	Solución numérica	285
8.4.2.	Ejemplo 2	289
8.4.2.1.	Condiciones y suposiciones	289
8.4.2.2.	Método de solución	289
8.4.2.3.	Solución numérica	289
8.4.3.	Ejemplo 3	291
8.4.3.1.	Condiciones y suposiciones	292
8.4.3.2.	Método de solución	293
8.4.3.3.	Solución numérica	294
8.5.	Ejercicios propuestos	297
8.5.1.	Ejercicio 1	297
8.5.2.	Ejercicio 2	298
8.5.3.	Ejercicio 3	298
8.5.4.	Ejercicio 4	298
8.5.5.	Ejercicio 5	298
8.5.6.	Ejercicio 6	298
8.5.7.	Ejercicio 7	299
8.5.8.	Ejercicio 8	299
8.5.9.	Ejercicio 9	299

<b>9. Bombas centrífugas</b>	<b>301</b>
9.1. Introducción . . . . .	301
9.2. Sistema hidráulico para una bomba centrífuga . . . . .	302
9.2.1. Tramo de succión . . . . .	303
9.2.2. Motobomba . . . . .	303
9.2.3. Tramo de impulsión . . . . .	304
9.3. Funcionamiento de una bomba . . . . .	305
9.3.1. Funcionamiento de una tubería con succión negativa . . . . .	305
9.3.1.1. Presión atmosférica . . . . .	306
9.3.1.2. Máxima carga (disponible) de presión de succión (absoluta) . . . . .	308
9.3.1.3. El movimiento en la tubería de succión negativa . . . . .	311
9.3.2. Entrada en régimen permanente . . . . .	315
9.3.3. Punto de operación de una bomba . . . . .	317
9.3.3.1. Curva característica de una bomba . . . . .	317
9.3.3.1.1. Ecuación de la curva característica de una bomba. . . . .	318
9.3.3.2. Curva de operación de un sistema hidráulico con bomba . . . . .	319
9.3.3.2.1. Ecuación de la curva de operación. . . . .	320
9.4. Selección de una bomba . . . . .	321
9.5. Condiciones para la correcta operación de una bomba . . . . .	323
9.5.1. Variables críticas para la correcta operación de una bomba . . . . .	323
9.5.2. Relación entre la carga de succión disponible y la necesaria . . . . .	324
9.5.2.1. Carga de succión disponible . . . . .	324

9.5.2.2.	Carga de succión necesaria . . . . .	326
9.5.3.	Punto de operación óptimo . . . . .	326
9.5.4.	Presencia de aire . . . . .	327
9.5.5.	Precauciones en el diseño del sistema hidráulico . . . . .	328
9.5.5.1.	Precauciones en el montaje de una motobomba . . . . .	331
9.6.	Ejemplos . . . . .	332
9.6.1.	Ejemplo 1 . . . . .	332
9.6.1.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	332
9.6.1.2.	Método de solución . . . . .	332
9.6.1.3.	Solución numérica . . . . .	333
9.6.2.	Ejemplo 2 . . . . .	334
9.6.2.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	334
9.6.2.2.	Método de solución . . . . .	334
9.6.2.3.	Solución numérica . . . . .	335
9.6.3.	Ejemplo 3 . . . . .	336
9.6.3.1.	Condiciones y suposiciones . . . . .	337
9.6.3.2.	Método de solución . . . . .	337
9.6.3.3.	Solución numérica . . . . .	338
9.7.	Ejercicios propuestos . . . . .	339
9.7.1.	Ejercicio 1 . . . . .	339
9.7.2.	Ejercicio 2 . . . . .	339
9.7.3.	Ejercicio 3 . . . . .	340

9.7.4. Ejercicio 4 . . . . .	340
9.7.5. Ejercicio 5 . . . . .	340
9.7.6. Ejercicio 6 . . . . .	341
9.7.7. Ejercicio 7 . . . . .	341
9.7.8. Ejercicio 8 . . . . .	341
<b>10.Sistemas de tuberías</b>	<b>342</b>
10.1. Introducción . . . . .	342
10.2. Sistemas de tuberías en serie . . . . .	343
10.2.1. Condición esencial de los sistemas de tuberías en serie . . . . .	343
10.2.2. Solución general para sistemas de tuberías en serie . . . . .	343
10.2.3. Aplicación práctica . . . . .	345
10.2.4. Tubo equivalente de un sistema de tuberías en serie . . . . .	345
10.2.5. Sistemas hidráulicos que incluyen turbomáquinas en serie . . . . .	347
10.2.5.1. Turbomáquina incluida en un sistema de tuberías en serie . . . . .	348
10.2.5.2. Sistemas de bombas en serie . . . . .	348
10.3. Sistemas de tuberías en paralelo . . . . .	349
10.3.1. Condición esencial de los sistemas de tuberías en paralelo . . . . .	350
10.3.1.1. Limitaciones . . . . .	351
10.3.2. Solución general del problema de tuberías en paralelo . . . . .	352
10.3.3. Aplicación práctica . . . . .	352
10.3.4. Tubo equivalente de un sistema de tuberías en paralelo . . . . .	352

10.3.5. Sistemas hidráulicos que incluyen turbomáquinas en paralelo . . . . .	353
10.3.5.1. Turbomáquinas incluidas en un sistema de tuberías en paralelo . . .	354
10.3.5.2. Sistemas de bombas en paralelo . . . . .	354
10.4. Ejemplos . . . . .	356
10.4.1. Ejemplo 1 . . . . .	356
10.4.1.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	356
10.4.1.2. Método de solución . . . . .	356
10.4.1.3. Solución numérica . . . . .	357
10.4.2. Ejemplo 2 . . . . .	358
10.4.2.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	358
10.4.2.2. Método de solución . . . . .	358
10.4.2.3. Solución numérica . . . . .	360
10.4.3. Ejemplo 3 . . . . .	362
10.4.3.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	362
10.4.3.2. Método de solución . . . . .	363
10.4.3.3. Solución numérica . . . . .	364
10.4.4. Ejemplo 4 . . . . .	366
10.4.4.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	367
10.4.4.2. Método de solución . . . . .	367
10.4.4.3. Solución numérica . . . . .	368
10.4.5. Ejemplo 5 . . . . .	370
10.4.5.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	370

10.4.5.2. Método de solución . . . . .	370
10.4.5.3. Solución numérica . . . . .	370
10.4.6. Ejemplo 6 . . . . .	371
10.4.6.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	371
10.4.6.2. Método de solución . . . . .	372
10.4.6.3. Solución numérica . . . . .	372
10.4.7. Ejemplo 7 . . . . .	373
10.4.7.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	374
10.4.7.2. Método de solución . . . . .	374
10.4.7.3. Solución numérica . . . . .	375
10.4.8. Ejemplo 8 . . . . .	378
10.4.8.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	379
10.4.8.2. Método de solución . . . . .	380
10.4.8.3. Solución numérica . . . . .	382
10.4.9. Ejemplo 9 . . . . .	386
10.4.9.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	387
10.4.9.2. Método de solución . . . . .	387
10.4.9.3. Solución numérica . . . . .	389
10.5. Ejercicios . . . . .	390
10.5.1. Ejercicio 1 . . . . .	390
10.5.2. Ejercicio 2 . . . . .	390
10.5.3. Ejercicio 3 . . . . .	390

10.5.4. Ejercicio 4 . . . . .	391
10.5.5. Ejercicio 5 . . . . .	391
10.5.6. Ejercicio 6 . . . . .	391
10.5.7. Ejercicio 7 . . . . .	392
10.5.8. Ejercicio 8 . . . . .	392
10.5.9. Ejercicio 9 . . . . .	393
10.5.10.Ejercicio 10 . . . . .	393
<b>11.Redes de tuberías</b>	<b>394</b>
11.1. Introducción . . . . .	394
11.2. Redes de tuberías . . . . .	395
11.2.1. Red abierta de tuberías . . . . .	395
11.2.2. Red cerrada de tuberías . . . . .	396
11.3. Empleo práctico . . . . .	397
11.3.1. Red abierta de tuberías . . . . .	397
11.3.2. Red cerrada de tuberías . . . . .	398
11.4. Método de cálculo . . . . .	398
11.4.1. Cálculo de redes abiertas de tuberías . . . . .	398
11.4.2. Cálculo de redes cerradas de tuberías . . . . .	399
11.4.2.1. Introducción . . . . .	399
11.4.2.2. El método de Cross . . . . .	400
11.4.2.2.1. El algoritmo de Cross. . . . .	402

11.4.2.2.2. Aplicación del algoritmo de Cross.	404
11.5. Ejemplos	407
11.5.1. Ejemplo 1	407
11.5.1.1. Condiciones y suposiciones	408
11.5.1.2. Método de solución	408
11.5.1.3. Solución numérica	409
11.5.2. Ejemplo 2	411
11.5.2.1. Condiciones y suposiciones	413
11.5.2.2. Método de solución	413
11.5.2.3. Solución numérica	414
11.5.3. Ejemplo 3	417
11.5.3.1. Condiciones y suposiciones	418
11.5.3.2. Método de solución	418
11.5.3.3. Solución numérica	421
11.5.4. Ejemplo 4	423
11.5.4.1. Condiciones y suposiciones	423
11.5.4.2. Método de solución	424
11.5.4.3. Solución numérica	426
11.5.5. Ejemplo 5	430
11.5.5.1. Condiciones y suposiciones	431
11.5.5.2. Método de solución	431
11.5.5.3. Solución numérica	433

11.5.6. Ejemplo 6 . . . . .	435
11.5.6.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	436
11.5.6.2. Método de solución . . . . .	436
11.5.6.3. Solución numérica . . . . .	438
11.5.7. Ejemplo 7 . . . . .	439
11.5.7.1. Condiciones y suposiciones . . . . .	439
11.5.7.2. Método de solución . . . . .	439
11.5.7.3. Solución numérica . . . . .	440
11.6. Ejercicios propuestos . . . . .	444
11.6.1. Ejercicio 1 . . . . .	444
11.6.2. Ejercicio 2 . . . . .	444
11.6.3. Ejercicio 3 . . . . .	445
11.6.4. Ejercicio 4 . . . . .	445
11.6.5. Ejercicio 5 . . . . .	446
11.6.6. Ejercicio 6 . . . . .	447
11.6.7. Ejercicio 7 . . . . .	448
11.6.8. Ejercicio 8 . . . . .	449
<b>A. El método de sobrerrelajación</b>	<b>451</b>
A.1. Introducción . . . . .	451
A.2. Bases del método . . . . .	451
A.2.1. Descripción del método . . . . .	451

A.2.1.1. Para una sola ecuación . . . . .	451
A.2.1.2. Para más de una ecuación . . . . .	454
A.3. Utilización con el computador . . . . .	455
A.4. Lista de funciones de Visual Basic empleadas . . . . .	456
A.4.1. FVB para calcular un caudal . . . . .	458
A.4.2. FVB para calcular diversos tipos de cargas . . . . .	460
A.4.3. FVB para calcular coeficientes de pérdida por accesorios . . . . .	461
A.4.4. Funciones para calcular el factor de fricción . . . . .	462
A.4.5. Funciones varias . . . . .	463

# Lista de figuras

1.1.	Distinción entre flujo a presión y a superficie libre. . . . .	12
1.2.	Funcionamiento a presión y a superficie libre de una conducción cerrada. . . . .	13
1.3.	Flujo a superficie libre y a presión en una misma conducción. . . . .	13
2.1.	Componentes de la carga en un conducto a presión. . . . .	19
2.2.	Líneas de energía y piezométrica en un conducto a presión. . . . .	22
2.3.	Interacción entre un líquido y un sólido. . . . .	24
2.4.	Tensiones desarrolladas por los arrastres por fricción y por forma en un paralelepípedo parcialmente sumergido en un líquido. . . . .	25
2.5.	Simulación numérica del movimiento de un fluido en régimen laminar, en la vecindad de un cilindro de longitud infinita. . . . .	26
3.1.	Elementos básicos para la deducción de la ecuación de Darcy–Weisbach. . . . .	30
3.2.	Fuerzas actuantes sobre el volumen de control empleado para la deducción de la ecuación de Darcy–Weisbach. . . . .	31
3.3.	Esquema simplificado de una instalación doméstica, básica, para suministro de agua potable. . . . .	33
3.4.	Capas límites dentro de una tubería, y desarrollo de estas. . . . .	52
3.5.	Subcapa laminar. . . . .	55

3.6.	Distribución de la tensión de corte y perfil de velocidades en una tubería. . . . .	56
3.7.	Elementos básicos para obtener la expresión para el cálculo del factor de fricción en flujo laminar. . . . .	59
4.1.	Esquema bidimensional para ilustrar el concepto de longitud de mezcla. . . . .	67
4.2.	Elementos para la deducción de la velocidad promedio en una tubería con superficie hidráulicamente lisa. . . . .	76
4.3.	Recreación del resultado de la experiencia clásica, para tubos no lisos, de Nikuradse. . . . .	87
4.4.	Comparación entre la variación del factor de fricción según experiencias de Nikuradse. . . . .	90
4.5.	Detalle idealizado de la relación entre la rugosidad absoluta y la subcapa laminar en una tubería comercial. . . . .	91
4.6.	Diagrama de Moody. . . . .	94
4.7.	Ejemplo 1. Representación esquemática. . . . .	97
4.8.	Ejemplo 2. Representación esquemática. . . . .	101
4.9.	Ejemplo 3. Representación esquemática. . . . .	105
4.10.	Ejemplo 4. Representación esquemática. . . . .	108
4.11.	Ejemplo 4. Información gráfica adicional. . . . .	109
4.12.	Ejercicio 5. Representación esquemática. . . . .	114
4.13.	Ejercicio 9. Representación esquemática. . . . .	115
5.1.	Evolución de la carga de presión estática con la pendiente de una tubería. . . . .	129
5.2.	Aparición de carga de presión negativa en una tubería. . . . .	131
5.3.	Variación de la relación $f/d_o^5$ con el diámetro de una tubería. Elaboración propia. . . . .	134
5.4.	Tuberías de acero inoxidable para varios diámetros. . . . .	137
5.5.	Variación, en tuberías, del coeficiente de Coriolis con el factor de fricción. . . . .	141

5.6.	Diámetro mínimo y máximo —en función del caudal— necesarios para que una tubería se ajuste a los requerimientos de velocidad máxima y mínima. . . . .	144
6.1.	Posibles comportamientos de una capa límite laminar en un cilindro infinito. . . . .	147
6.2.	Detalle del comportamiento del flujo ante el cambio de la geometría de una tubería. . . . .	149
6.3.	Sistema hidráulico integrado por tuberías de diferente diámetro. . . . .	154
6.4.	Representación de la línea de energía cuando se consideran pérdidas locales. . . . .	155
6.5.	Esquema para ilustrar las condiciones para el funcionamiento estacionario de la conducción a presión. . . . .	158
6.6.	Algunas combinaciones prácticas de condiciones de borde de aguas arriba y de aguas abajo en una tubería. . . . .	159
6.7.	Ejercicio3. Representación esquemática del ejercicio. . . . .	176
6.8.	Ejercicio 4. Representación esquemática. . . . .	176
7.1.	Detalle de los vórtices ocasionados por el cambio de geometría entre un tanque y una tubería. . . . .	180
7.2.	Parámetros geométricos que influyen en la pérdida por entrada en una tubería —desde un tanque—. . . . .	181
7.3.	Algunas disposiciones particulares para la entrada a una tubería desde un tanque. . . . .	183
7.4.	Representación esquemática de una ampliación brusca. . . . .	184
7.5.	Elementos para caracterizar una transición. . . . .	188
7.6.	Esquema para señalar la diferencia entre una unión y una bifurcación. . . . .	193
7.7.	Comportamiento hidráulico debido al cambio de dirección en una tubería. . . . .	193
7.8.	Cambio de dirección mediante una unión. . . . .	194
7.9.	Esquemas para el estudio del comportamiento hidráulico de una bifurcación o una unión. . . . .	195

7.10.	Distribuciones factibles de flujo para accesorios <b>T</b> .	201
7.11.	Casos extremos de funcionamiento para accesorios <b>T</b> .	202
7.12.	Distribuciones factibles de flujo con accesorios <b>Y</b> .	203
7.13.	Casos extremos de funcionamiento para accesorios <b>Y</b> .	204
7.14.	Curva configurada con tramos rectilíneos en una tubería.	205
7.15.	Codo típico de 90°.	206
7.16.	Elementos geométricos de un codo.	206
7.17.	Variación de la carga piezométrica entre el punto interno y externo de un codo.	207
7.18.	Distribución de velocidades y de presiones en un codo, suponiendo que el flujo es ideal.	209
7.19.	Longitud de salida entre dos codos consecutivos.	210
7.20.	Variación del coeficiente de pérdida por codo en función del ángulo $\theta$ , en codos de PVC y para diferentes $R/d_o$ .	213
7.21.	Variación del coeficiente de pérdida por codo en función de la relación $R/d_o$ , en un codo de 90°, en PVC.	214
7.22.	Variación del coeficiente de pérdida en función de la rugosidad relativa, en un codo de 90°.	215
7.23.	Esquema para la representación general de una válvula.	217
7.24.	Gráfica de la calibración de una válvula.	218
7.25.	Sección transversal de una tubería, empleada para calcular la curva de calibración de una válvula.	219
7.26.	Esquema para ilustrar el efecto regulador de una válvula sobre el caudal.	220
7.27.	Corte lateral y transversal de una válvula de compuerta.	222
7.28.	Corte lateral de una válvula de cheque de disco oscilante.	223

7.29.	Corte lateral de una válvula de pie. . . . .	224
7.30.	Vista lateral de una válvula de globo completamente abierta. . . . .	225
7.31.	Vista lateral de una válvula de mariposa de eje horizontal. . . . .	226
7.32.	Corte lateral y frontal de una válvula de esfera completamente abierta. . . . .	227
7.33.	Ejemplo 2. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	241
7.34.	Ejemplo 2. Curva de calibración considerando la pérdida por válvula únicamente. . . . .	245
7.35.	Ejercicio 2. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	246
7.36.	Ejercicio 5. Representación esquemática. . . . .	247
8.1.	Definición operativa de máquina. . . . .	249
8.2.	Esquema simplificado para ilustrar los dos tipos de máquina de fluido. . . . .	250
8.3.	Esquema para entender el funcionamiento de una máquina generadora de desplazamiento positivo. . . . .	252
8.4.	Un tipo de rodete para bomba centrífuga. . . . .	253
8.5.	Esquema, bastante simplificado, de un rodete de turbina Pelton. . . . .	254
8.6.	Esquema de una turbomáquina y el sistema hidráulico al que se halla integrada. . . . .	256
8.7.	Esquema para representar un tipo de sistema hidráulico con baja demanda de carga de bomba. . . . .	259
8.9.	Esquema de la mitad de un rodete de bomba. . . . .	265
8.10.	Detalle del flujo en una máquina generadora tipo bomba centrífuga. . . . .	269
8.11.	Esquema general de una turbomáquina y su sistema hidráulico. . . . .	271
8.12.	Esquema simplificado para ilustrar el funcionamiento de una bomba que es alimentada por acción de la gravedad. . . . .	272

8.13.	Esquema simplificado para ilustrar el funcionamiento de una bomba que es alimentada por aspiración. . . . .	272
8.14.	Área del flujo en un canal. . . . .	276
8.15.	Ejemplo 3. Sistema hidráulico propuesto. . . . .	292
8.16.	Ejercicio 8. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	299
8.17.	Ejercicio 9. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	300
9.1.	Esquema para ilustrar un sistema hidráulico para una bomba-c. . . . .	303
9.2.	Vista frontal de una bomba para destacar las partes de su carcasa. . . . .	304
9.3.	Esquema clásico para ilustrar el comportamiento de la presión (expresada como carga) en las escalas manométrica y absoluta. . . . .	309
9.4.	Detalle de la tubería de succión negativa en una bomba . . . . .	313
9.5.	Imagen para ilustrar el desarrollo del fenómeno transitorio en una bomba. . . . .	316
9.6.	Curva característica de una bomba. . . . .	318
9.7.	Curva característica de una bomba y curvas del sistema. . . . .	319
9.8.	Esquema para representar un bombeo clásico con succión negativa y su correspondiente sistema hidráulico. . . . .	320
9.9.	Curva característica de una bomba. Para hacer notar el punto de operación óptimo. . . . .	327
9.10.	Rango de operación segura para una bomba. . . . .	329
9.11.	Gráfico similar al de la figura 9.3, adaptado para mostrar cómo debe ser la relación entre las dos variables $NPSH$ , de manera tal que se evite la cavitación. . . . .	330
9.12.	Detalles relacionados con la ubicación de la tubería de succión en el tanque de alimentación. . . . .	331
9.13.	Ejemplo 2. Cálculo del punto de operación. . . . .	336
9.14.	Ejemplo 3. $NPSH_d$ y $NPSH_n$ . . . . .	339

10.1.	Una aplicación clásica de un sistema de tuberías en serie. . . . .	345
10.2.	Detalle parcial de un sistema hidráulico con bombas en serie. . . . .	348
10.3.	Curva característica para dos bombas de iguales conectadas en serie. . . . .	349
10.4.	Ejemplo de un sistema de tuberías en paralelo. . . . .	350
10.5.	Representación esquemática de las posibilidades de integración de turbomáquinas a sistemas de tuberías en paralelo. . . . .	354
10.6.	Curva característica para el sistema de dos bombas (iguales) en paralelo. . . . .	355
10.7.	Ejemplo 1. Representación esquemática del ejemplo. . . . .	356
10.8.	Ejemplo 2. Representación esquemática del ejemplo. . . . .	358
10.9.	Ejemplo 3. Dimensiones propuestas para las tuberías y cargas para dichas dimensiones. . . . .	366
10.10.	Ejemplo 7. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	373
10.11.	Ejemplo 7. Puntos de operación para un sistema operando con una bomba y con dos bombas, iguales, en serie. . . . .	377
10.12.	Ejemplo 8. Representación esquemática. . . . .	378
10.13.	Ejemplo 8. Puntos de operación para una bomba simple y dos en paralelo. . . . .	386
10.14.	Ejemplo 9. Representación esquemática. . . . .	387
10.15.	Ejemplo 9. Distribución inicial de los caudales del ejemplo. . . . .	388
10.16.	Ejemplo 9. Distribución final de los caudales (en $m^3/s$ ). . . . .	389
10.17.	Ejercicio 3. Representación esquemática. . . . .	390
10.18.	Ejercicio 6. Representación esquemática. . . . .	392
10.19.	Ejercicio 8. Representación esquemática. . . . .	393
11.1.	Representación esquemática de una red abierta de tuberías. . . . .	395

11.2.	Representación esquemática de una red cerrada de tuberías. . . . .	396
11.3.	Notación para uso con el método de Cross. . . . .	400
11.4.	Un circuito cualquiera de una red cerrada de tuberías y sus circuitos adyacentes. . . . .	401
11.5.	Recorrido para realizar la verificación del balance de pérdidas de carga en una red cerrada. . . . .	406
11.6.	Ejemplo1. Esquema en planta de un desarrollo hidráulico para propósito múltiple. . . . .	407
11.7.	Ejemplo 1. Resumen de las respuestas del ejemplo. . . . .	411
11.8.	Ejemplo 2. Representación esquemática. . . . .	412
11.9.	Ejemplo2. Resumen de las respuestas. . . . .	417
11.10.	Ejemplo 3. Representación esquemática. . . . .	418
11.11.	Ejemplo 3. Sentidos posibles de los caudales. . . . .	419
11.12.	Resultados del cálculo de la red abierta de tuberías. . . . .	422
11.13.	Ejemplo 4. Representación esquemática del ejemplo. . . . .	423
11.14.	Ejemplo 4. Posibles sentidos de los caudales en las distintas tuberías de la red abierta. . . . .	424
11.15.	Ejemplo 4. Casos posibles de distribución de caudales en la red abierta de tuberías. . . . .	426
11.16.	Ejemplo 4. Distribución final de caudales en la red abierta de tuberías. . . . .	428
11.17.	Ejemplo 5. Planta del sistema hidráulico. . . . .	430
11.18.	Ejemplo 4. Distribución de caudales en las tuberías del sistema hidráulico. . . . .	431
11.19.	Ejemplo5. Diseño de diámetros del sistema hidráulico. . . . .	434
11.20.	Ejemplo 6. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	435
11.21.	Ejemplo 6. Sentido de los caudales en el sistema hidráulico. . . . .	436
11.22.	Distribución final de caudales en el sistema hidráulico. . . . .	438

11.23. Ejemplo 7. Representación esquemática de la red cerrada de tuberías. . . . .	439
11.24. Ejemplo 7. Propuesta de distribución inicial de caudales para la red cerrada de tuberías. . . . .	440
11.25. Ejemplo 7. Estado de la red cerrada de tuberías tras la primera corrección de caudales o caso 1 ( $k = 1$ ); ver la tabla 11.19. Allí puede corroborarse fácilmente el balance de pérdidas. . . . .	442
11.26. Ejemplo 7. La red cerrada de tuberías completamente balanceada. Los caudales están en $l/s$ . . . . .	444
11.27. Ejercicio 4. Representación esquemática del sistema hidráulico. . . . .	445
11.28. Ejercicio 5. Esquema del suministro de agua para una fábrica. . . . .	447
11.29. Ejercicio 6. Esquema del sistema hidráulico. . . . .	448
11.30. Ejercicio 7. Esquema del sistema hidráulico. . . . .	449
11.31. Ejercicio 8. Esquema del sistema hidráulico. . . . .	450

# Lista de tablas

3.1.	Parámetros para análisis dimensional con el factor de fricción. . . . .	47
3.2.	Variación —para flujo turbulento— del parámetro adimensional $L_E/d_o$ con el número de Reynolds en una tubería. . . . .	54
3.3.	Variación de la longitud de entrada a una tubería expresada en función del diámetro. Los valores fueron determinados para $\mathbb{R} = 1000000$ y $L_E/d_o = 44$ . . . . .	54
4.1.	Valores de rugosidad para diferentes materiales (nuevos). . . . .	89
4.2.	Procedimiento de sobrerrelajación, ejemplo 4.2. . . . .	103
5.1.	Resultados de la estimación en laboratorio del diámetro interior y la rugosidad de tuberías de acero inoxidable. . . . .	136
5.2.	Reynolds límite basados en catálogos comerciales de tuberías. . . . .	138
5.3.	Valores extremos del factor de fricción de acuerdo con la información incluida en catálogos comerciales de tuberías. . . . .	139
5.4.	Valores extremos del coeficiente de Coriolis. . . . .	141
5.5.	Carga de velocidad y velocidad en condiciones de diseño. . . . .	143
5.6.	Rango de diámetros que permite limitar la velocidad máxima a $2.0\text{ m/s}$ . . . . .	145
5.7.	Valores de una carga de velocidad de referencia, $h_v = 0.165\text{ m}$ , obtenidos con el coeficiente de Coriolis inferior y superior correspondiente a cada material —los señalados en la tabla 5.4—. . . . .	145

6.1.	Ejemplo 2. Sobrerrelajación. . . . .	172
6.2.	Ejemplo 3. Variación de la carga y de la carga piezométrica con la abscisa. . . . .	175
7.1.	Coefficientes de pérdida por accesorios tipo <b>T</b> formados por tuberías de igual diámetro, en función de la relación de caudales. . . . .	201
7.2.	Coefficientes de pérdida por accesorios tipo <b>Y</b> formados por tuberías de igual diámetro, en función de la relación de caudales. . . . .	203
7.3.	Variación de $C_O$ con $L_O/d_o$ en un codo de $90^\circ$ y $R/d_o = 1$ . . . . .	215
7.4.	Valores de coeficiente de válvula según CRANE. . . . .	226
7.5.	Coefficiente de pérdida por válvula de esfera. . . . .	227
7.6.	Valores del coeficiente global de pérdida local para diferentes combinaciones de accesorios. . . . .	233
7.7.	Variación de la relación $h_f/h_e$ con $L/d_o$ para un caso práctico. La tercera columna contiene la longitud de la tubería para el diámetro de la aplicación — $d_o = 0.231\text{ m}$ —. . . . .	236
7.8.	Ejemplo 2. Detalle de la sobrerrelajación. . . . .	243
7.9.	Ejemplo 2. Variación del caudal con el grado de apertura de la válvula. . . . .	244
8.1.	Valores relativos de las constantes de la ecuación (8.24) según el tipo de turbomáquina. . . . .	280
8.2.	Combinaciones posibles de tipos de raíces en la ecuación de energía para turbomáquinas. . . . .	282
8.3.	Ejemplo 1. Evolución de las raíces de la ecuación cúbica con el cambio de la potencia de la turbina. . . . .	287
8.4.	Ejemplo 1. Sobrerrelajación para corregir la solución de la ecuación cúbica. . . . .	288
8.5.	Ejemplo 2. Sobrerrelajación. . . . .	291
8.6.	Ejemplo 3. Sobrerrelajación. . . . .	296

9.1.	Variación del parámetro $\lambda$ en función de la altura sobre el nivel del mar para diferentes ciudades de Colombia y de América. . . . .	310
9.2.	Valores del parámetro $\kappa_m$ , utilizado para estimar la potencia del motor de una bomba. . . . .	323
9.3.	Ejemplo 2. Puntos de la curva característica. . . . .	335
9.4.	Ejemplo 2. Cálculo de la curva de operación. . . . .	337
9.5.	Ejercicio 5. Presiones de succión e impulsión. . . . .	340
10.1.	Ejemplo 1. Datos de las tuberías. . . . .	356
10.2.	Ejemplo 1. Detalle del procedimiento de sobrerrelajación. . . . .	357
10.3.	Ejemplo 2. Cálculo del coeficiente de resistencia por fricción equivalente. . . . .	360
10.4.	Ejemplo 2. Detalle del procedimiento de sobrerrelajación. . . . .	362
10.5.	Ejemplo 3. Cálculo, por sobrerrelajación, del diámetro de una sola tubería. . . . .	365
10.6.	Ejemplo 3. Variación de la carga de presión, con las longitudes de las tuberías. . . . .	366
10.7.	Ejemplo 4. Elementos para el cálculo, por fricción equivalente, del coeficiente de resistencia. . . . .	368
10.8.	Ejemplo 4. Cálculo del diámetro para tubos de PVC. . . . .	369
10.9.	Ejemplo 4. Cálculo del diámetro para tubos de hierro fundido. . . . .	369
10.10.	Ejemplo 4. Cálculo del diámetro para tubos de acero. . . . .	369
10.11.	Ejemplo 4. Variación con la rugosidad del diámetro para cada tubo equivalente. . . . .	369
10.12.	Ejemplo 5. Cálculo de los caudales de cada tubo del sistema. . . . .	371
10.13.	Ejemplo 6. Sobrerrelajación para determinar la diferencia de nivel entre tanques. . . . .	372
10.14.	Ejemplo 7. Constantes de la curva característica. . . . .	373
10.15.	Ejemplo 7. Cálculo de la curva de operación. . . . .	376

10.16.	Ejemplo 8. Constantes de la curva característica. . . . .	378
10.17.	Ejemplo 8. Elementos para el cálculo de la curva de operación para dos bombas conectadas en paralelo. . . . .	384
10.18.	Ejemplo 8. Elementos para el cálculo de la curva de operación del sistema en paralelo funcionando con una sola bomba. . . . .	385
10.19.	Ejemplo 9. Sobrerrelajación. . . . .	389
11.1.	Ejemplo 1. Datos de las tuberías. . . . .	407
11.2.	Ejemplo 1. Cálculo por sobrerrelajación para la conexión paralelo-serie. . . . .	410
11.3.	Ejemplo 2. Datos de las tuberías. . . . .	412
11.4.	Ejemplo 3. Datos de los tubos. . . . .	418
11.5.	Ejemplo 3. Tanteo suponiendo que el tanque $C$ actúa como receptor — $S = 1$ —. . . . .	422
11.6.	Ejemplo 3. Tanteo suponiendo que el tanque $C$ actúa como alimentador. . . . .	422
11.7.	Ejemplo 4. Propiedades de las tuberías. . . . .	423
11.8.	Ejemplo 4. Combinaciones factibles de sentidos de los caudales. . . . .	425
11.9.	Ejemplo 4. Sobrerrelajación para el caso 1. . . . .	427
11.10.	Ejemplo 4. Sobrerrelajación para el caso 2. . . . .	427
11.11.	Ejemplo 4. Sobrerrelajación para el caso 3. . . . .	428
11.12.	Ejemplo 4. Pérdidas de carga en las tuberías de la red abierta. . . . .	429
11.13.	Ejemplo 5. Longitud de las tuberías de la red abierta. . . . .	430
11.14.	Ejemplo 5. Tanteos para determinar los diámetros de la tubería troncal. . . . .	433
11.15.	Ejemplo 5. Diseño de las tuberías secundarias. . . . .	434
11.16.	Ejemplo 6. Propiedades de las tuberías. . . . .	435

11.17.	Ejemplo 6. Resultado de la sobrerrelajación. . . . .	438
11.18.	Ejemplo 7. Caso 0. Verificación del balance de pérdidas. . . . .	441
11.19.	Ejemplo 7. Caso 1. Verificación del balance de pérdidas. . . . .	441
11.20.	Ejemplo 7. Caso 2. Verificación del balance de pérdidas. . . . .	442
11.21.	Ejemplo 7. Caso 3. Verificación del balance de pérdidas. . . . .	443
11.22.	Ejemplo 7. Caso 4. Verificación del balance de pérdidas. . . . .	443
11.23.	Ejemplo 7. Caudales finales y variación de su valor en cada iteración ( $k$ ). . . . .	444
11.24.	Ejercicio 4. Posibles casos de operación en la red abierta de tuberías. . . . .	446
11.25.	Ejercicio 5. Propiedades geométricas de las tuberías del sistema hidráulico. . . . .	447
11.26.	Ejercicio 6. Propiedades geométricas de las tuberías en la red abierta. . . . .	449
A.1.	Interacciones iniciales de $f(x) = 0$ . . . . .	453
A.2.	Detalle de la sobrerrelajación para $f(x) = 0$ . . . . .	454
A.3.	Sobrerrelajación para el sistema de ecuaciones $f_i(x, y) = 0$ . . . . .	455

# Introducción

La hidráulica es la herramienta operativa que se utiliza en actividades de diseño relacionadas con líquidos.

Se sirven de ella, por lo tanto, ingenieros de diversas especialidades, cuyo campo de acción se puede situar tanto en la industria como en la infraestructura.

En esta última, con el recurso agua, bien sea para proteger la infraestructura de sus efectos nocivos o para beneficiarse de ella, como elemento vital (agua potable) o como fuente de producción de electricidad (hidroelectricidad).

La hidráulica evolucionó a partir de la mecánica de fluidos, una rama especializada de la mecánica del medio continuo. En este sentido, cabría afirmar que la hidráulica no es otra cosa que la versión aplicada de la mecánica de fluidos.

La mecánica de fluidos toma los principios de conservación de la mecánica —masa, energía, cantidad de movimiento lineal y cantidad de movimiento angular— y los adapta para su utilización con gases y líquidos.

La hidráulica hace su propia adecuación, para utilizarlos con líquidos en aplicaciones prácticas. De esta manera, estos se constituyen en las *herramientas de la herramienta*.

Los cursos de hidráulica —como asignatura separada de la mecánica de fluidos— comenzaron a formalizarse e integrarse a los currículos de las carreras de ingeniería en las universidades europeas durante la primera mitad del siglo 19. Este hecho se fue replicando, y así hicieron su aparición en los programas similares del continente americano.

Al principio, como un cuerpo global, sin hacer una distinción especial en el tratamiento para conducciones a presión y a superficie libre —lo que se suele denominar de forma habitual como tuberías y canales— y con ello crear asignaturas separadas orientadas a impartir una instrucción particular y especializada para tuberías y canales; esto es, ofrecer primero un curso de hidráulica de tuberías y posteriormente otro de hidráulica de canales.

Con el tiempo, el mundo académico acogió esas dos opciones para la enseñanza de la hidráulica. Las preferencias por una u otra han mostrado bastante variabilidad a lo largo del tiempo —las instituciones han vacilado; yendo y viniendo entre una y otra— y del espacio.

En las universidades de Estados Unidos, por ejemplo, se reserva, hoy todavía, el pregrado para la hidráulica de tuberías —con una mínima incursión, si acaso, en la de canales; por ello, este tipo de curso se denomina *hidráulica*— y el postgrado para la hidráulica de canales.<sup>1</sup>

En la Universidad EAFIT, donde imparto la asignatura desde hace más de 25 años, he tenido que adaptarme a estas opciones, y a variaciones de ellas; a saber: un curso de hidráulica aplicada de 90 horas semestrales, en donde se consideran tanto tuberías como canales —con el laboratorio como materia separada—; el mismo tipo de curso anteriormente citado, pero con 48 horas de instrucción teórica y 32 de laboratorio; una parte de hidráulica de tuberías separada e integrada a un segundo curso de mecánica de fluidos —formalmente, *mecánica de fluidos 2*— y la asignatura de hidráulica de canales.

A lo largo de la experiencia docente se hizo evidente la falta de material bibliográfico adecuado, en forma independiente a la opción de enseñanza adoptada.

Este hecho aparece mucho más acentuado en el caso de la hidráulica de canales, en la que me formaron, durante el pregrado, con un material de apoyo de carácter avanzado; esto es, más adaptado para el quehacer del ingeniero formado y con experiencia —vale decir, el consultor— que para aquel en formación.

En particular, porque la componente conceptual de un curso de esta índole es más densa y compleja —la verdad sea dicha— que la de uno de hidráulica de tuberías.

Por esta razón, en un momento dado de todos esos años de ejercicio docente resultó apremiante la necesidad de construir un texto para apoyar la enseñanza de la hidráulica de canales.

Hacia julio de 2006 este empeño fructificó en un texto publicado por el Fondo Editorial de la Universidad EAFIT: *Hidráulica de canales fundamentos*.

La menor densidad y la inferior complejidad conceptual del curso de hidráulica de tuberías fueron difiriendo la elaboración de un texto similar y mi dedicación en el campo de la escritura se centró en la producción de material para la mecánica del medio continuo. De este empeño resultaron tres libros; dos de ellos ya publicados por el Fondo Editorial de la Universidad EAFIT: uno dedicado al medio continuo clásico (2009) y otro al medio continuo generalizado (2014). El tercero, concebido para ser utilizado en cursos de maestría.

Visto lo anterior, este libro de *Hidráulica de tuberías*, que usted amable lector tiene entre sus

---

<sup>1</sup>Y en más de un caso, en el pregrado se tiene por allí un curso de ¡mecánica de fluidos e hidráulica!

manos, surgió como otra etapa más de esta empresa —por lo demás apoyada y compartida por la Institución— para dejar codificado el estilo de entender y enseñar las asignaturas que un profesor ha tenido a su cargo.

La verdadera necesidad de escribir un libro como este, aparte de las ya mencionadas consideraciones de continuidad dentro de una actividad que es solo una parte del quehacer docente, llegó a ser clara para mí en la medida que el texto tomaba forma y alcanzaba una dimensión importante. Ahí entendí que la manera cómo había impartido el curso en el aula se había encargado de soslayar el apremio académico.

Es que para el docente es más sencillo adaptar los contenidos de la hidráulica de tuberías — que aquellos de la de canales— a la instrucción dentro del aula cuando existen limitaciones de tiempo. En otras palabras: resulta más expedito justificar las fórmulas y los métodos en hidráulica de tuberías y con esto evacuado pasar directamente a las aplicaciones —el trámite conceptual es más extenso en la de canales—. Sin duda, este estilo de trabajo contribuyó a mantener latente un acicate, o motivador, de índole académica.

De este modo, los amplios contenidos de este texto sirven para complementar lo que quedó faltando en el aula, y si se quiere, también llenar vacíos que sin duda existen.

En este sentido, tengo la esperanza de que este libro también sirva para motivar al estudiante a adherirse a la disciplina del autodidactismo y así asumir finalmente el verdadero compromiso que tiene con su propia formación.

Podría decirse que el protagonista central de la obra es el principio de conservación de la energía. Su participación se hace más o menos patente a lo largo de las tres partes en que podría dividirse el libro; más allá del primer capítulo, el cual cumple con la función de situar al lector en la especificidad de la hidráulica de tuberías, al contrastarla, en buena medida, con la de canales.

Entre el capítulo dos y el siete (la primera parte) este protagonismo es más acusado.

Todo parte del teorema de Bernoulli, el cual debe ser allí modificado para hacerlo aplicable al mundo real. Esto se logra al poner de relieve los aspectos que generan la conversión de la energía propia del flujo en otras que quedan marginadas del ciclo cerrado de energía potencial energía cinética y que, por lo tanto, dejan estas energías inservibles para generar movimiento en el líquido.<sup>2</sup>

Se trata, sin duda, de los efectos de la fricción —allí incluido el de transferencia de cantidad de movimiento —propio del flujo turbulento— y de la llamada *forma*. Esto ocurre a la altura del capítulo segundo. Con ello, se perfila el trabajo por realizar en los capítulos siguientes.

---

<sup>2</sup>Por esta razón, en el lenguaje hidráulico, estos eventos se denominan *pérdidas de energía*, lo cual no parece muy acorde con lo que preconiza la física a este respecto. En el sitio indicado, se hará la aclaración respectiva.

El capítulo tercero se ocupa de la deducción de una ecuación para calcular la pérdida de energía cuando solo se toma en cuenta la fricción; se arriba así a la célebre y útil ecuación de Darcy–Weisbach.

Esta expresión incorpora una variable novedosa, el factor de fricción, a cuyo cálculo se requiere dedicarle un capítulo completo, en este caso el cuarto.

Los capítulos seis y siete están dedicados a examinar la influencia de la forma en la pérdida de energía. El seis presenta el problema, centrándolo en el coeficiente de pérdida por forma (coeficiente de pérdida local), el cual está ligado a la presencia de accesorios en las tuberías. Es bueno anotar que en este mismo capítulo se introduce el llamado problema del tubo simple, el cual es fundamental para argumentar, por un lado, y para realizar aplicaciones prácticas en los capítulos finales de esta obra.

Para el cálculo de los coeficientes de pérdida local utilizados con más frecuencia por el ingeniero, se ha separado el capítulo séptimo.

En la mayoría de los escasos libros de hidráulica de tuberías, en sentido estricto, y en los de mecánica de fluidos que la asumen como tema complementario, no es frecuente ver un despliegue generoso de espacio para tratar las pérdidas por forma. Es para solventar tal deficiencia que en el presente texto se dedica una amplia exposición y dedicación al tema.

El capítulo cinco se ha separado para impartir alguna información importante para adentrarse en el diseño de tuberías. Por consiguiente, rompe la continuidad expositiva centrada en la energía. Los elementos más salientes de este capítulo son el coeficiente de Coriolis (se trata de aclarar finalmente allí en qué condiciones puede hacerse equivalente a la unidad); la importancia del diámetro en el diseño de tuberías (allí incluida una aclaración acerca de la disponibilidad de diversos diámetros en el mercado) y el cuidado especial que se debe tener con el comportamiento de la resión.

En esta primera parte la energía de origen gravitatorio es la única responsable de la propulsión del líquido —a través del establecimiento de un salto bruto—. Por ello, en la segunda parte, que conforman los capítulos octavo y noveno, aparece en escena el concepto de máquina hidráulica; no solamente para entregarle a un líquido energía adicional —máquina generadora—, sino para aprovechar la propia del líquido y transformarla en otra —máquina motora—.

El capítulo octavo se ocupa de las generalidades de las máquinas hidráulicas, para enfocarse finalmente en las turbomáquinas. El noveno ha sido separado para un tipo especial de estas, las bombas centrífugas, las cuales constituyen un artefacto esencial en los sistemas hidráulicos usados para abastecimiento de agua en aquellos sitios en que la topografía lo impone.

La tercera parte del texto —capítulo décimo y undécimo— es una generalización del problema del tubo simple, en términos de las conexiones en serie y en paralelo de tuberías, a las que se dedica propiamente el capítulo décimo, y de las redes abiertas y cerradas de tubos (capítulo undécimo).

Puede afirmarse que los últimos cuatro capítulos constituyen la parte aplicada de la obra, pero especialmente el noveno y el undécimo (sin olvidar el quinto, claro está).

Un aspecto especialmente notable de la hidráulica de tuberías es su sorprendente complejidad operativa, lo cual puede explicarse en dos razones: la primera es que, si bien el tratamiento es estrictamente algebraico, las ecuaciones empleadas son no lineales —el caudal es un término cuadrático, y a veces cúbico, y las ecuaciones para el cálculo del factor de fricción son funciones logarítmicas—; la segunda es que, en las formas más generales, los problemas incorporan un número ilimitado de ecuaciones no lineales.

Por esta razón, los métodos habituales utilizados para resolver ecuaciones simultáneas resultan inaplicables y es imperativo emplear el método de sobrerrelajación.

En la redacción del libro se ha tenido en cuenta esta particularidad —y que es al aspecto al que más tiempo se le dedica tiempo en el aula—. Esto, mediante la utilización de funciones de Visual Basic ligadas a una hoja electrónica de Microsoft Excel —la cual se entrega con esta obra—. Se hace uso intensivo de ellas en los ejemplos resueltos a lo largo del texto y se espera que el lector lo replique al desarrollar los ejercicios propuestos.

Pensando en esto, al final de la obra, en un apéndice, se entregan las nociones básicas del método de sobrerrelajación y se hace una descripción de las funciones de Visual Basic utilizadas en este texto.

Como dije en un párrafo anterior, no existen muchos libros de hidráulica de tuberías —con ese designativo específico— y este hecho puede ser corroborado en la bibliografía suministrada en la parte final de este texto, donde esta denominación no es muy frecuente. Esto no implica, necesariamente, que el tema no sea tratado, pues uno se topa con él en los libros de mecánica de fluidos; muchos de ellos verdaderos compendios de la ciencia hidráulica, por la cantidad y la variedad de temas de que se ocupan.

Termino agradeciendo a la Divina Providencia por su asistencia en un trabajo que en un principio pensaba era el más sencillo de cuantos había emprendido hasta ahora, pero que al final no resultó siéndolo tanto, en virtud de su tamaño en texto, gráficas, tablas, etc.

Así mismo al profesor Julián Vidal Valencia, jefe del Departamento de Ingeniería Civil, por haber concedido el tiempo de labor académica necesario para sacar adelante este proyecto, y por continuar creyendo en la bondad y la continuidad del trabajo de escribir para la academia.

Juan H. Cadavid R.

Medellín, Antioquia