
APÉNDICE

Solución de problemas de tuberías

Ecuación de Bernoulli Generalizada:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + z_1 - h_{f1-2} + H_{B,V} - H_T + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + z_2$$

Ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas primarias:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

En función del caudal:

$$h_f = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5} Q^2$$

Perdidas secundarias:

Usando el método de longitud equivalente

$$h_f = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{8fL_{eq}}{g\pi^2 D^5} Q^2$$

Usando el método del coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria K :

$$h_f = K \frac{V^2}{2g} = K \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^4}$$

Velocidad V en función del caudal Q :

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Existen cuatro casos generales:

- a) L, Q, D conocidas ΔP o H (altura de una turbomáquina) desconocida
- b) ΔP o H, Q, D conocidas y L desconocida
- c) ΔP o H, L, D conocidas y Q desconocida
- d) ΔP o H, L, Q conocidas y D desconocida

a. L, Q, D conocidas ΔP desconocida:

El factor de fricción se obtiene con el diagrama de Moody o de las ecuaciones empíricas empleando los factores R_{eD} y $\frac{\varepsilon}{D}$ calculado a partir de los datos proporcionados. La pérdida de la carga total se calcula en base a la ecuación de Darcy-Weisbach.

Luego se emplea la ecuación de Bernoulli generalizada y se hacen las simplificaciones adecuadas según el problema para evaluar la caída de presión ΔP o la altura ($H_{B,V}$ ó H_T) de la turbomáquina si el problema lo requiere.

b. ΔP o H, Q, D conocidas y L desconocida:

La perdida de la carga total h_{f1-2} se calcula a partir de la ecuación de Bernoulli generalizada con las simplificaciones adecuadas según el problema. Un factor de fricción se obtiene del diagrama de Moody o de ecuaciones empíricas empleando los valores de R_{eD} y $\frac{\varepsilon}{D}$, calculados con la base de datos proporcionados. La longitud desconocida se obtiene resolviendo la ecuación de Darcy-Weisbach en donde aparece la longitud del tramo desconocido.

c. ΔP o H, L, D conocidas y Q desconocida

La ecuación de Bernoulli generalizada, con las simplificaciones adecuadas según el problema, se combina con la ecuación de definición correspondiente a las pérdidas de carga, ecuación de Darcy-Weisbach; el resultado es una expresión para la velocidad en la tubería \bar{V} o el caudal Q en términos del factor de fricción f . La mayor parte de los flujos de tubería de interés para la ingeniería tienen número de Reynolds relativamente grandes. Aun cuando el número de Reynolds (y por lo tanto f) no pueden calcularse debido a que no se conoce Q , una primera buena suposición para el factor de fricción se toma de la región completamente rugosa o zona de régimen completamente turbulento. Empleando el valor de f supuesto se calcula una primera aproximación de V o Q . El número de Reynolds se calcula para esta V y se obtiene un nuevo valor de f y con este nuevo valor se recalcula V o Q obteniendo una segunda aproximación. Puesto que f es una función que depende del número de Reynolds, es raro que se requieran más de dos iteraciones para la convergencia.

Cuando se tiene un sistema de tuberías con diferentes diámetros, es preferible combinar la ecuación de Bernoulli generalizada con la ecuación de Darcy-Weisbach en función del caudal, así como cada una de las velocidades que aparezcan, deberán ser expresadas en función del caudal, ya que los diámetros de los diferentes tramos de tubería deben ser conocidos. A partir de la ecuación de Bernoulli generalizada se obtiene una ecuación para el caudal en función de los diferentes factores de fricción de Darcy según el número de tramos de diferente diámetro que se tengan en el problema. La primera aproximación para estos factores de fricción se toma de la zona completamente turbulenta, iterando hasta obtener la convergencia del valor del caudal.

d. ΔP o H, L, Q conocidas y D desconocida

Cuando se conoce la turbomáquina que maneja un fluido y se conoce la geometría del sistema de tuberías, el problema es determinar el **tamaño de tubería más pequeño** y por lo tanto de menor costo, el cual puede entregar el fluido deseado. Puesto que el diámetro de la tubería se desconoce, ni el número de Reynolds ni la rugosidad relativa pueden calcularse directamente, por lo tanto se requiere una solución iterativa.

Los cálculos se inician suponiendo el diámetro de la tubería de ensayo. Después se calculan el número de Reynolds y la rugosidad relativa utilizando el diámetro supuesto. Se obtiene un factor de fricción y se calcula la pérdida de carga usando la ecuación de Darcy-Weisbach y se resuelve la ecuación de Bernoulli generalizada con las simplificaciones apropiadas para verificar si se satisface el requerimiento del sistema, que puede ser una limitación en la caída de presión ΔP .

Si la ΔP de ensayo es demasiado, se repiten los cálculos para un valor de D supuesto más grande. Si la ΔP de ensayo es menor que el criterio, debe verificarse una D más pequeña, hasta encontrar el diámetro mínimo que cumpla con el requerimiento del sistema.

Al elegir el tamaño de la tubería es lógico trabajar con los diámetros que son disponibles comercialmente. Las tuberías se fabrican con un número limitado de tamaños estándar.

TABLAS DE DIÁMETROS COMERCIALES

Tabla 1 (Crane. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Mc Graw Hill, 1987).

Tuberías Comerciales de Acero. Con base en ANSI B36.10: 1970 y BS 1600: Parte 2: 1970.									
Espesor de la Tubería según número de cédula.									
<i>Cédula</i>	<i>Medida nominal de la tubería en pulgadas</i>	<i>Diámetro exterior (mm)</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Diámetro interior (mm)</i>	<i>Cédula</i>	<i>Medida nominal de la tubería en pulgadas</i>	<i>Diámetro exterior (mm)</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Diámetro interior (mm)</i>
Cédula 10	14	355,6	6,35	342,9	Cédula 80	3 1/2	101,6	8,08	85,4
	16	406,4	6,35	393,7		4	114,3	8,56	97,2
	18	457,2	6,35	444,5		5	141,3	9,52	122,3
	20	508	6,35	495,3		6	168,3	10,97	146,4
	24	609,6	6,35	596,9		8	219,1	12,7	193,7
Cédula 20	30	762	7,92	746,2		10	273	15,09	242,8
	8	219,1	6,35	206,4		12	323,9	17,47	289
	10	273	6,35	260,3		14	355,6	19,05	317,5
	12	323,9	6,35	311		16	406,4	21,44	363,5
	14	355,6	7,92	339,8		18	457,2	23,82	409,6
	16	406,4	7,92	390,6		20	508	26,19	455,6
	18	457,2	7,92	441,4		24	609,6	30,96	547,7
	20	508	9,52	489	Cédula 100	8	219,1	15,09	188,9
	24	609,6	9,52	590,6		10	273	18,26	236,5
	30	762	12,7	736,6		12	323,9	21,44	281
Cédula 30	8	219,1	7,04	205		14	355,6	23,82	308
	10	273	7,8	257,4		16	406,4	26,19	354
	12	323,9	8,38	307,1		18	457,2	29,36	398,5
	14	355,6	9,52	336,6		20	508	32,54	442,9
	16	406,4	9,52	387,4		24	609,6	38,89	531,8
	18	457,2	11,13	434,9		4	114,3	11,13	92
	20	508	12,7	482,6		5	141,3	12,7	115,9
	24	609,6	14,27	581,1		6	168,3	14,27	139,8
	30	762	15,88	730,2		8	219,1	18,26	182,6
Cédula 40	1/8	10,3	1,73	6,8	Cédula 120	10	273	21,44	230,1
	1/4	13,7	2,24	9,2		12	323,9	25,4	273,1
	3/8	17,1	2,31	12,5		14	355,6	27,79	300
	1/2	21,3	2,77	15,8		16	406,4	30,96	344,5
	3/4	26,7	2,87	21		18	457,2	34,92	387,4
	1	33,4	3,38	26,6		20	508	38,1	431,8
	1 1/4	42,2	3,56	35,1		24	609,6	46,02	517,6
	1%	48,3	3,68	40,9	Cédula 140	1	219,1	20,62	177,9
	2	60,3	3,91	52,5		10	273	25,4	222,22
	2 1/2	73	5,16	62,7		12	323,9	28,58	266,7
	3	88,9	5,49	77,9		14	355,6	31,75	292,1
	3%	101,6	5,74	90,1		16	406,4	36,52	333,4

Ingeniería Mecánica – ULA Venezuela

	4	114,3	6,02	102,3		18	457,2	39,69	377,8
	5	141,3	6,55	128,2		20	508	44,45	419,1
	6	168,3	7,11	154,1		24	609,6	52,39	504,8
	8	219,1	8,18	202,7		1/2	21,3	4,78	11,7
	10	273	9,27	254,5		3/4	26,7	5,56	15,6
	12	323,9	10,31	303,3		1	33,4	6,35	20,7
	14	355,6	11,13	333,3		1 1/4	42,2	6,35	29,5
	16	406,4	12,7	381		1 1/2	48,3	7,14	34
	18	457,2	14,27	428,7		2	60,3	8,74	42,8
	20	508	15,09	477,8		2 1/2	73	9,52	54
	24	609,6	17,48	574,6		3	88,9	11,13	66,6
Cédula 60	8	219,1	10,31	198,5	Cédula 160	4	114,3	13,49	87,3
	10	273	12,7	247,6		5	141,3	15,88	109,5
	12	323,9	14,27	295,4		6	168,3	18,26	131,8
	14	355,6	15,09	325,4		8	219,1	23,01	173,1
	16	406,4	16,64	373,1		10	273	28,58	215,8
	18	457,2	19,05	419,1		12	323,9	33,34	257,2
	20	508	20,62	466,8		14	355,6	35,71	284,2
	24	609,6	24,61	560,4		16	406,4	40,49	325,4
	1/8	10,3	2,41	5,5		18	457,2	45,24	366,7
Cédula 80	1/4	13,7	3,02	7,7		20	508	50,01	408
	3/8	17,1	3,2	10,7		24	609,6	59,54	490,5
	1/2	21,3	3,73	13,8					
	3/4	26,7	3,91	18,9					
	1	33,4	4,55	24,3					
	1 1/4	42,2	4,85	32,5					
	1 1/2	48,3	5,08	38,1					
	2	60,3	5,54	49,2					
	2 1/2	73	7,01	59					
	3	88,9	7,62	73,7					

Tabla 1 (Continuación)

B-13a. Tuberías comercial de acero (continuación) Con base en ANSI B36.10: 1970 y BS 1600: Parte 2: 1970							
<i>Tubería de espesor estándar</i>				<i>Tubería extra reforzada</i>			
<i>Medida nominal de la tubería en pulgadas</i>	<i>Diámetro exterior (mm)</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Diámetro interior (mm)</i>	<i>Medida nominal De la tubería En pulgadas</i>	<i>Diámetro exterior (mm)</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Diámetro interior (mm)</i>
1/48	16,3	2,24	9,2	1/8	10,30	2,41	5,50
3/8	17,1	2,31	12,5	1/4	13,70	3,02	7,70
1/2	21,3	2,77	15,8	3/8	17,10	3,20	10,70
3/4	26,7	2,87	21	1/2	21,3	3,73	13,8
1				3/4	26,7	3,91	18,9
1 1/4	42,2 - 33,4	3,56 - 3,38	26,6 - 35,1	1	33,4	4,55	24,3
2	48,3	3,68	40,9	1 1/4	42,2	4,85	32,5
2 1/2	60,3 - 73,0	3,91 - 5,16	62,7 - 52,5	1 1/2	48,3	5,08	38,1
3	88,9	5,49	77,9	2	60,3	5,54	49,2
3 1/2	101,6	5,74	90,1	2 1/2	73	7,01	59
4	114,3	6,02	102,3	3	88,9	7,62	73,7
5				3%	101,6	8,08	85,4
6	141,3-168,3	7,11 - 6,55	128,2 - 154,1	4	114,3	8,56	97,2
8	219,1 s	8,18	202,7	5	141,3	9,52	122,3
10	273,0 s	9,27	254,5	6	168,3	10,97	146,4
12	323,9 s	9,52	304,9	8	219,1	12,7	193,7
				10	273	12,7	247,6
				12	323,9	12,7	298,5

Tubería doble extra reforzada			
Medida nominal de la tubería en pulgadas	Diámetro Exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)
1/2	21,3	7,47	6,4
3/4	26,7	7,82	11,1
1	33,4	9,09	15,2
1 1/4	42,2	9,7	22,8
1 1/2	48,3	10,16	28
2	60,3	11,07	38,2
2 1/2	73	14,02	45
3	88,9	15,24	58,4
4	114,3	17,12	80,1
5	141,3	19,05	103,2
6	168,3	21,95	124,4
8	219,1	22,22	174,7
10	273	25,4	222,2
12	323,9	25,4	273,1

Tabla 2 (Crane. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Mc Graw Hill, 1987).

B-16. Tuberías comerciales de acero.							
Extraído de ISO 339 * 1974 y BS 3600 : 1973							

Medida nominal de la tubería en pulgadas	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Medida nominal de la tubería en pulgadas	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro Interior (mm)
1/8	10,2	1,6	7	2	60,3	3,6	53,1
		1,8	6,6			4	52,3
		2	6,2			4,5	51
		2,3	5,6			5	50,3
		1,8	9,9			5,4	49,5
		2	9,5			5,6	49,1
1/4	13,5	2,3	8,9	5,4	5,6	5,9	48,5
		2,6	8,3			6,3	47,7
		2,9	7,7			7,1	46,1
		2	13,2			8	44,3
		2,3	12,6			8,8	42,7
		2,6	12			10	40,3
3/8	17,2	2,9	11,4	2%	76,1	11	38,3
		3,2	10,8			5	66,1
		2,6	16,1			5,4	65,3
1/2	21,3						

			2,9	15,5			5,6	64,9
			3,2	14,9			5,9	64,3
			3,6	14			6,3	63,5
			4	13,3			7,1	61,9
			4,5	12,3			8	60,1
			5	11,3			8,8	58,5
			5,4	10,3			10	56,1
1/4	26,9	2,6	21,7				11	54,1
		2,9	21,1				12,5	51,1
		3,2	20,5				14,2	47,7
		3,6	19,7	3	88,9		5,4	78,1
		4	18,9				5,6	77,7
		4,5	17,9				5,9	77,1
		5	16,9				6,3	76,3
		5,4	16,1				7,1	74,7
		5,6	15,7				8	72,9
		5,9	15,1				8,8	71,3
		6,3	14,3				10	68,9
		7,1	12,7				11	66,9
33,7	3,2	27,3					12,5	63,9
		3,6	26,5				14,2	60,5
		4	25,7				16	56,9
		4,5	24,7	3%	101,6		5,6	90,4
		5	23,7				5,9	89,8
		5,4	22,9				6,3	89
		5,6	22,5				7,1	87,4
		5,9	21,9				8	85,6
		6,3	21,1				8,8	84
		7,1	19,5				10	81,6
		8	17,7				11	79,6
		8,8	16,1				12,5	76,6
1 1/4	42,4	3,2	36				14,2	73,2
		3,6	35,2				16	69,6
		4	34,4				17,5	66,6
		4,5	33,4	4	114,3		5,6	103,1
		5	32,4				5,9	102,5
		5,4	31,6				6,3	101,7
		5,6	31,2				7,1	100,1
		5,9	30,6				8	98,3
		6,3	29,8				8,8	96,7
		7,1	28,2				10	94,3
		8	26,4				11	92,3
		8,8	24,8				12,5	89,3
		10	*22,4				14,2	85,9

1%	48,3	3,2	41,9	5	139,7	16	82,3			
		3,6	41,1			17,5	79,3			
		4	40,3			20	74,3			
		4,5	39,3			5,9	127,9			
		5	38,3			6,3	127,1			
		5,4	37,5			7,1	125,5			
		5,6	37,1			8	123,7			
		5,9	36,5			8,8	122,1			
		6,3	35,7			10	119,7			
		7,1	34,1			11	117,7			
		8	32,3			12,5	114,7			
		8,8	30,7			14,2	111,3			
		10	28,3			16	107,7			
*No está incluido en BS 3600: 1973						17,5	104,7			
						20	99,7			

Tabla 2 (Continuación)

B-16. Tuberías comerciales de acero (continuación)							
Medida nominal de la tubería en pulgadas	Diámetro exterior (mm)	Espesor	Diámetro interior (mm)	Medida nominal de la tubería en pulgadas	Diámetro exterior (mm)	Espesor	Diámetro interior (mm)
6	168,3	6	. 3	155,7	16	406,4	6 . 3 393,8
			7,1	154,1			7,1 392,2
			8	152,3			8 390,4
			8,8	150,7			8,8 388,8
			10	148,3			10 386,4
			11	146,3			11 384,4
			12,5	143,3			12,5 381,4
			14,2	139,9			14,2 378
			16	136,3			16 374,4
			17,5	133,3			17,5 371,4
			20	128,3			20 366,4
			22,2	123,9			22,2 362
		219,1	6,3	206,5			25 356,4
			7,1	204,9			28 *350,4
			8	203,1			30 *346,4
			8,8	201,5			32 *342,4
			10	199,1			36 *334,4
			11	197,1			40 *326,4
			12,5	194,1			45 *316,4
			14,2	190,7	18	457	6,3 444,4
			16	187,1			7,1 442,8

			17,5	184,1			8	441
			20	179,1			8,8	439,4
			22,2	174,7			10	437
			25	169,1			11	435
10	273	6,3	260,4				12,5	432
		7,1	258,8				14,2	428,6
		8	257				16	425
		8,8	255,4				17,5	422
		10	253				20	417
		11	251				22,2	412,6
		12,5	248				25	407
		14,2	244,6				28	*401
		16	241				30	*397
		17,5	238				32	*393
		20	233				36	*385
		22,2	228,6				40	377
		25	223				45	*367
		28	*217				50	*357
		30	*213,0	20	508	6,3	495,4	
12	323,9	6,3	311,3			7,1	493,8	
		7,1	309,7			8	492	
		8	307,9			8,8	490,4	
		8,8	306,3			10	488	
		10	303,9			11	486	
		11	301,9			12,5	483	
		12,5	298,9			14,2	479,6	
		14,2	295,5			16	476	
		16	291,5			17,5	473	
		17,5	288,9			20,2	468	
		20	283,9			22,2	463,6	
		22,2	279,5			25	458	
		25,2	273,9			28	*452	
		28,2	*267,9			30	*448	
		30,3	*263,9			32	*444	
		32	*259,9			36	*436	
		36	*251,9			40	*428	
14	355,6	6,3	343			45	*418	
		7,1	341,4			50	*408	
		8	339,6			55	*398	
		8,8	338	24	610	6,3	597,4	
		10	335,6			7,1	595,8	
		11	333,6			8	594	
		12,5	330,6			8,8	592,4	
		14,2	327,2			10	590	

		16	323,6			11	588
		17,5	320,6			12,5	585
		20	315,6			14,2	581,6
		22,2	311,2			16	578
		25	305,6			17,5	575
		28	*299,6			20	570
		30	*295,6			22,2	565,6
		32	*291,6			25	560
		36	*283,6			28	*554
* No está incluido en BS 3600:1973						30	*550
						32	*546
						36	*538
						40	*530
						45	*520
						50	*510
						55	*500
						60	*490

RESÚMEN DE ECUACIONES PARA CALCULO DE PÉRDIDAS EN TUBERIAS

Régimen Laminar

$$f = \frac{64}{R_{eD}}$$

$$h_f = \frac{64}{R_{eD}} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

En función del caudal:

$$h_f = \frac{128\mu L}{\gamma\pi D^4} Q$$

Esto se cumple en Régimen Laminar tanto para tuberías lisas como rugosas

$$f = f(Re)$$

Flujo turbulento:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

En función del caudal:

$$h_f = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5} Q^2$$

$$h_f = R_h Q^2$$

$$R_h = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5}$$

R_h Resistencia hidráulica de la tubería.

Cálculo de f en Régimen Turbulento, tuberías lisas $\epsilon = 0$ para $2.000 < Re < 100.000$. Ecuación de Blasius:

$$f = \frac{0.316}{R_{eD}^{1/4}}$$

Cálculo de f en Régimen Turbulento, tuberías lisas $\epsilon = 0$ para $Re > 100000$: se aplica la 1era ecuación de Karman-Prandtl:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(R_{eD} \sqrt{f}) - 0.8$$

Tuberías comerciales o de rugosidad natural. En la zona de transición en que $f = f(R_{eD}, \frac{\epsilon}{D})$ se cumple la Ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{R_{eD} \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación Universal de Pérdida de carga en los conductos industriales. Los problemas prácticos con frecuencia se encuentran en esta zona de transición.

También para Tuberías comerciales o de rugosidad natural, la ecuaciones de **Swamee y Jain (1976)** representan con precisión la relación de Colebrook, con la ventaja de tener el factor de fricción de forma explícita, la ecuación para el factor de fricción es:

$$f = 1.325 \left\{ \ln \left[0.27 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + 5.74 \left(\frac{1}{R_{eD}} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad 10^{-8} < \frac{e}{D} < 0.01 \quad 5000 < Re < 10^8$$

$$h_f = 1.07 \frac{Q^2 L}{g D^5} \left\{ \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7 D} + 4.62 \left(\frac{v D}{Q} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad 10^{-6} < \frac{e}{D} < 10^{-2} \quad 3000 < Re < 3 * 10^8$$

$$Q = -0.965 \left(\frac{g D^5 h_f}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \left(\frac{3.17 v^2 L}{g D^3 h_f} \right)^{0.5} \right] \quad Re > 2000$$

$$D = 0.66 \left[\varepsilon^{1.25} \left(\frac{L Q^2}{g h_f} \right)^{4.75} + v Q^{9.4} \left(\frac{L}{g h_f} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad 10^{-6} < \frac{e}{D} < 10^{-2} \quad 5000 < Re < 3 * 10^8$$

Tuberías Comerciales o de rugosidad natural a número de Reynolds tanto más elevados cuando el flujo se encuentra en la **región totalmente turbulenta**, en donde el factor de fricción no depende de R_{eD} se cumple la segunda ecuación de *Karman-Prandtl*. Esta ecuación se puede usar cuando no se conoce el caudal y por lo tanto no se puede calcular el número de R_{eD} . Entonces, con esta ecuación se puede obtener la primera aproximación del factor de fricción en la zona de turbulencia total, en función sólo de la rugosidad relativa.

$$f = \left[\frac{1}{2 \log \left(\frac{1}{2 \frac{\varepsilon}{D}} \right) + 1.74} \right]^2$$

La ecuación de *Colebrook – White* es asintótica tanto a la primera Ecuación de *Karman-Prandtl* en donde $f = f(R_{eD})$ como a la segunda $f = f(\frac{\varepsilon}{D})$

Existen también otras ecuaciones empíricas que permiten el cálculo del coeficiente de resistencia. Una de ellas es la expresión de R_h para la ecuación de Hazen-Williams:

$$R_h = \frac{K_1 L}{C^{1.85} D^{4.87}}$$

Donde C es el coeficiente de Hazen-Williams que depende solo de la aspereza (ver tabla) y K_1 es una constante que depende del sistema de unidades utilizado: para SI $K_1 = 10,59$ y para unidades inglesas $K_1 = 4,72$.

Otra de estas expresiones empíricas es la expresión de R_h para la ecuación de Chezy-Manning, que se usa mayormente para flujo en canales abiertos, pero puede también utilizarse en el caso de flujo en tuberías, principalmente cuando se estudia el flujo en drenajes que fluyen llenos. Para esta ecuación la expresión del coeficiente de resistencia es:

$$R_h = \frac{10.29 n^2 L}{K_2 D^{5.33}}$$

Donde n es el coeficiente de Manning (ver tabla) y K_2 depende del sistema de unidades: Para SI $K_2 = 1$ y para unidades inglesas $K_2 = 2,22$.

La ventaja del uso de estas últimas dos formulaciones es que permiten determinar un valor de coeficiente de resistencia independiente del número de Reynolds, y su inconveniente es que presentan un valor muy aproximativo, siendo más preciso el método de Hazen-Williams que el de Chezy-Manning.

Todas las expresiones anteriores son referidas a pérdidas de carga primarias en tuberías, sin embargo si utilizamos el método de la longitud equivalente para las pérdidas secundarias, bastará sustituir la longitud por la suma de la longitud real más la longitud equivalente. Por ejemplo en el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach el valor de R_h será:

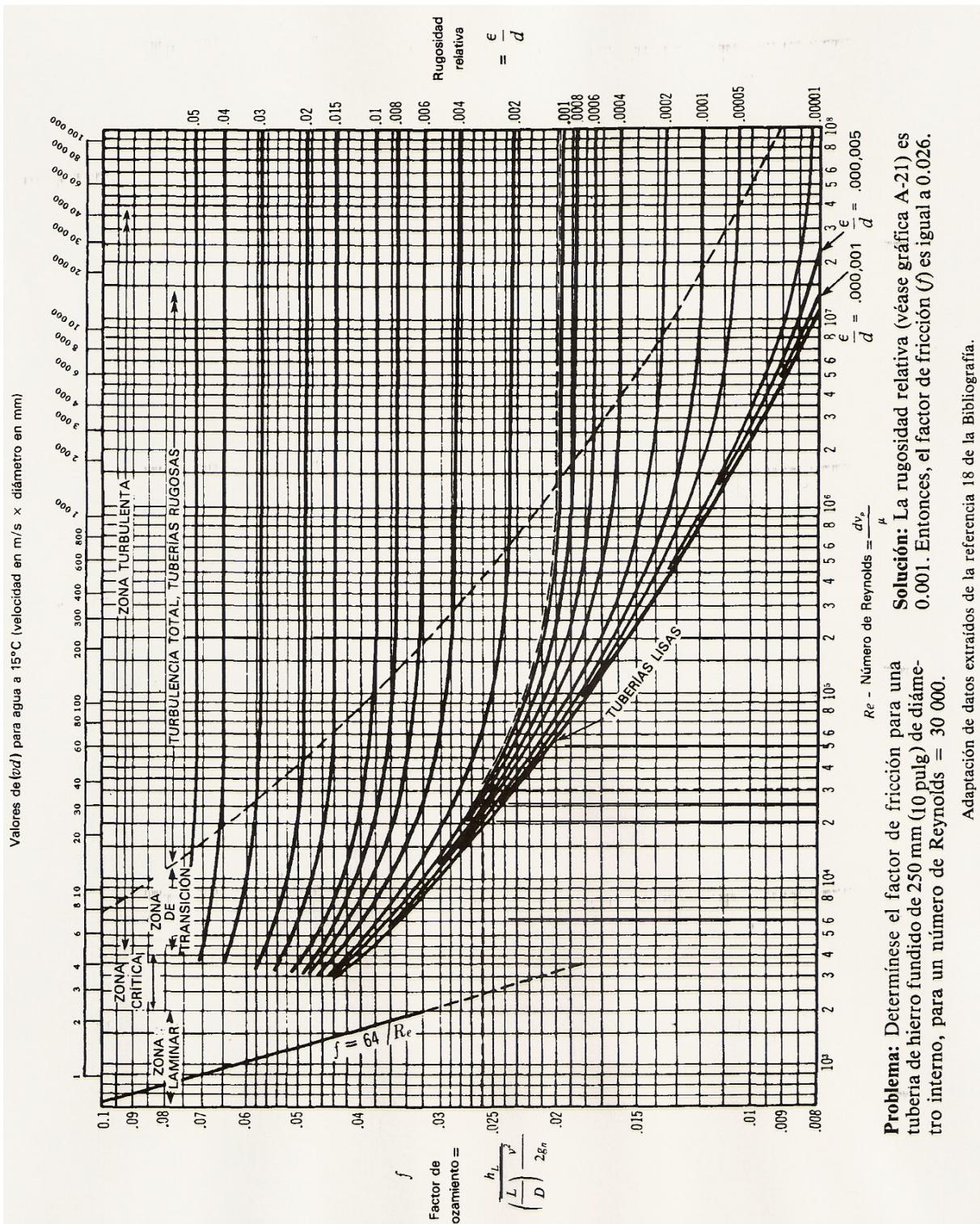
$$R_h = \frac{8f(L + L_{eq})}{g\pi^2 D^5}$$

Tabla 3 Coeficientes de Hazen-Williams y Manning

<i>Tipo de tubería</i>	<i>Coeficiente de Hazen-Williams C</i>
Extremadamente lisa; asbesto-cemento	140
Hierro colado nuevo o liso; hormigón	130
Estacas de madera; acero recién soldado	120
Hierro colado ordinario; acero recién remachado; arcilla vitrificada	110
Hierro colado o acero remachado después de algunos años de uso	95-100
Tuberías viejas deterioradas	60-80

<i>Material de la Tubería</i>	<i>Coeficiente de Manning n</i>
Madera cepillada	0.012
Madera no cepillada	0.013
Concreto acabado	0.012
Concreto no acabado	0.014
Tubería de alcantarillado	0.013
Tubería de concreto	0.015
Tabique	0.016
Hierro colado o forjado	0.015
Acero remachado	0.017
Canal metálico corrugado	0.025
Tierra recta	0.022
Grava	0.03
Tierra con piedras y hierbas	0.035
Arroyos de montaña	0.05

DIAGRAMA DE MOODY



Problema: Determinese el factor de fricción para una tubería de hierro fundido de 250 mm (10 pulg) de diámetro interno, para un número de Reynolds = 30 000.

Solución: La rugosidad relativa (véase gráfica A-21) es 0.001. Entonces, el factor de fricción (f) es igual a 0.026.

Adaptación de datos extraídos de la referencia 18 de la Bibliografía.

Rugosidades Absolutas**Tabla 4 Rugosidad absoluta de tuberías comerciales**

	ε (pies)	ε (mm)
Acero remachado	0.01	3
Concreto	0.001-0.01	0.3-3
Madera	0.001	0.3
Hierro colado	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro forjado	0.00015	0.046
Tubos estirados	0.000005	0.0015

Tabla 5 Valores recomendados de rugosidad para conductos comerciales

(Frank M. White. Mecánica de Fluidos 5ta Edición)

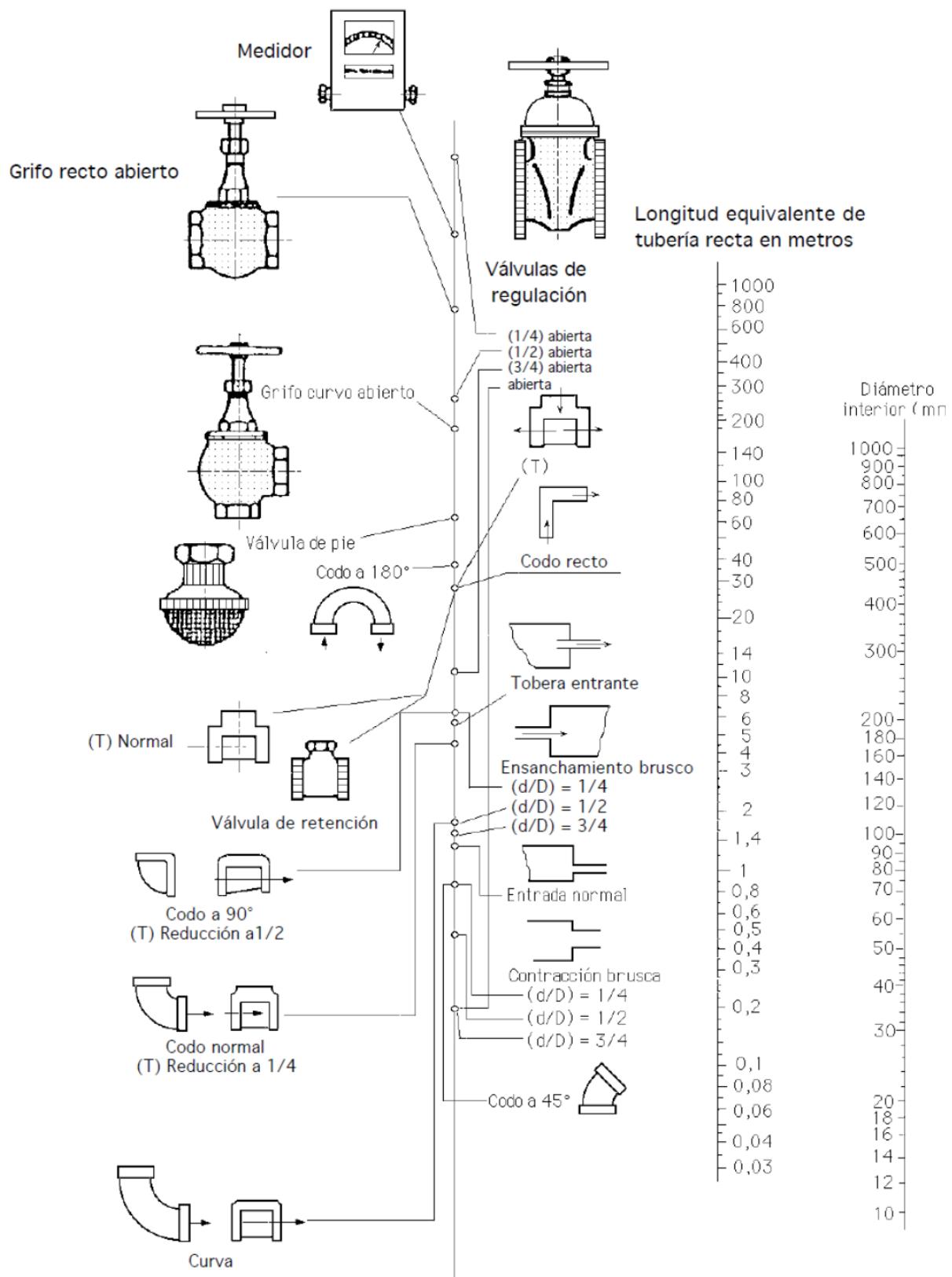
Material	Condición	ε		
		ft	mm	Incertidumbre, %
Acero	Lámina metálica, nueva	0,00016	0,05	±60
	Inoxidable	0,000007	0,02	±50
	Comercial, nuevo	0,00015	0,046	±30
	Estriado	0,01	3	±70
Hierro	Oxidado	0,007	2	±50
	Fundido, nuevo	0,00085	0,26	±50
	Forjado, nuevo	0,00015	0,046	±20
	Galvanizado, nuevo	0,0005	0,15	±67
Latón	Fundido asfáltico	0,0004	0,12	±40
	Laminado	0,000007	0,002	±50
Plástico	Tubo laminado	0,000005	0,0015	±60
Vidrio	-----	Liso	Liso	
Hormigón	Liso	0,00013	0,04	±60
	Rugoso	0,007	2	±50
Caucho	Liso	0,000033	0,01	±60
Madera	En duelas	0,0016	0,5	±40

TABLAS Y MONOGRAMAS PARA CALCULAR PÉRDIDAS SECUNDARIAS

Tabla 6 Relaciones de Longitudes equivalentes adimensionales representativas $(\frac{L_e}{D})$ para válvulas y accesorios
(Robert W. Fox y Alan T. Macdonald. Introducción a la Mecánica de Fluidos. 4ta Edición)

<i>Tipo de Accesorio</i>	<i>Longitud Equivalente, (Le/D)</i>
Válvulas (completamente abiertas)	
Válvulas de compuerta	8
Válvulas de globo	340
Válvulas de ángulo	150
Válvulas de bola	3
Válvulas de retención: de bola	600
Válvulas de retención: de disco	55
Válvulas de pie con filtro: disco con resortes	420
Válvulas de pie con filtro: disco articulado	75
Codo estándar: 90°	30
Codo estándar: 45°	16
Codo de retorno, 180°	50
T estándar: flujo directo	20
T estándar: flujo derivado	60
Válvula check de compuerta	135

ABACO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PERDIDAS DE CARGA EN ACCESORIOS
en metros de longitud de tubería equivalente



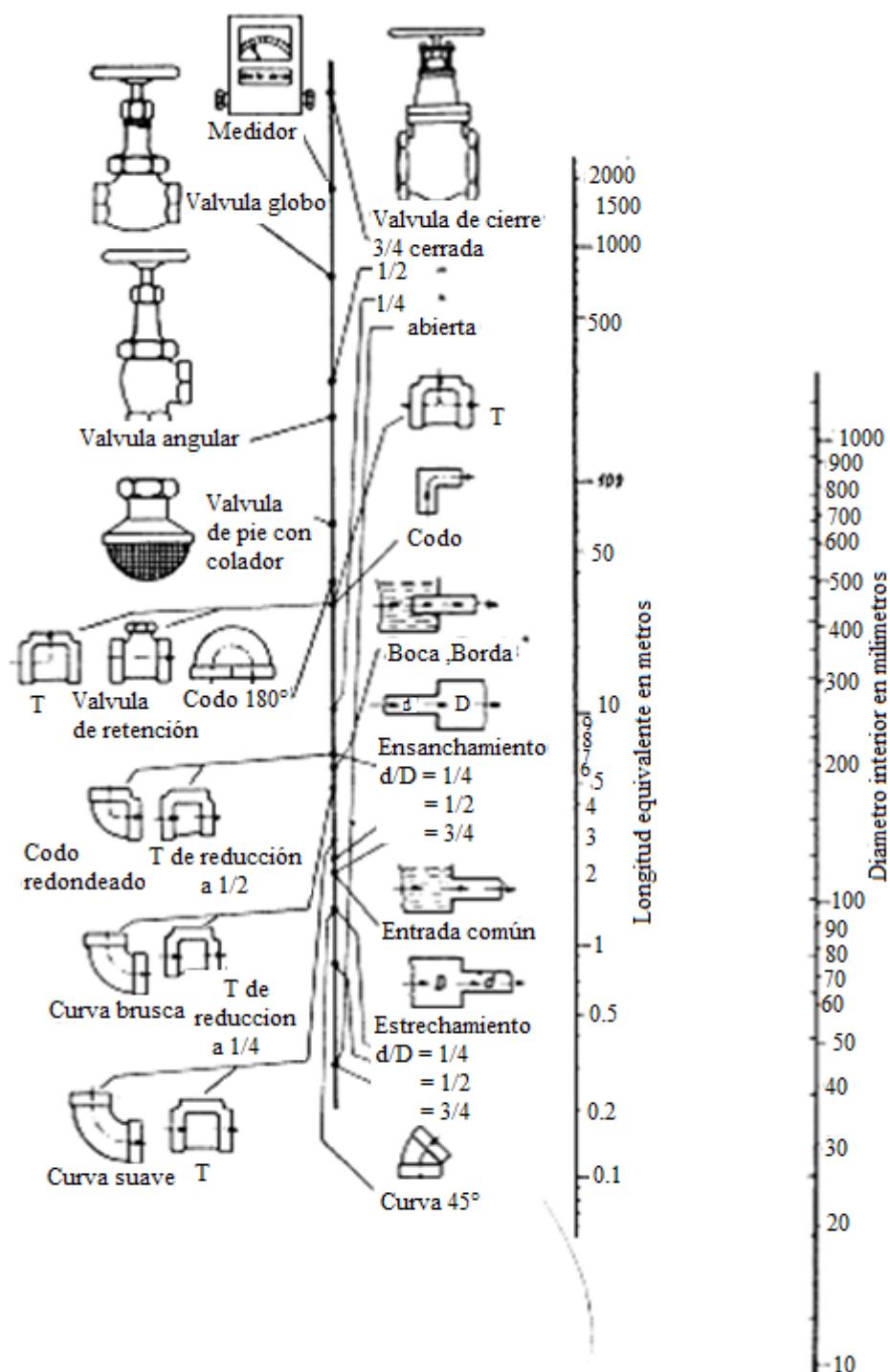


Tabla 7 Coeficientes de pérdida K para válvulas abiertas, codos y tes

		Diámetro nominal, in								
		Roscado				Acoplada				
		1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
Válvulas (abiertas):										
Globo		14,00	8,20	6,90	5,70	13,00	8,50	6,00	5,80	5,5
Compuerta		0,30	0,24	0,16	0,11	0,80	0,35	0,16	0,07	0,03
De retención		5,10	2,900	2,10	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2
De ángulo		9,00	4,70	2,00	1,00	4,50	2,40	2,00	2,00	2
Codos:										
45° normal		0,39	0,32	0,30	0,29	0,21	0,20	0,19	0,16	0,14
45° suave		2,00	1,50	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21
90° normal		1,00	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,1
90° suave		2,00	1,50	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25	0,2
180° normal						0,40	0,30	0,21	0,15	0,1
180° suave										
«Tes»:		0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14	0,10	0,07
Flujo directo		2,40	1,80	1,40	1,10	1,00	0,80	0,64	0,58	0,41
Flujo lateral										

Tabla 8 Coeficientes de pérdida nominal K (flujo turbulento)

(Merle C. Potter. Mecánica de Fluidos. 3ra Edición)

Tipo de pieza de conexión		Roscada			Embridada	
Diámetro	2.5cm	5in	10cm	5cm	10cm	20cm
Válvula de globo (totalmente abierta)	8.2	6.9	5.7	8.5	6.0	5.8
(medio abierta)	20	17	14	21	15	14
(un cuarto abierto)	57	48	40	60	42	41
Válvula angular (totalmente abierta)	4.7	2.0	1.0	2.4	2.0	2.0
Válvula de retención de charnela (totalmente abierta)	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0.24	0.16	0.11	0.35	0.16	0.07
Codo de retorno	1.5	0.95	0.64	0.35	0.30	0.25
Te (ramal)	1.8	1.4	1.1	0.80	0.64	0.58
Te (Lineal)	0.9	0.9	0.9	0.19	0.14	0.10
Codo estándar	1.5	0.95	0.64	0.39	0.30	0.26
Codo de curva larga	0.72	0.41	0.23	0.30	0.19	0.15
Codo a 45°	0.32	0.30	0.29			
Entrada a escuadra				0.5		
Entrada reentrante				0.8		
Entrada redondeada				0.03		
Salida de tubo				1.0		
	Relación de área					
Contratación repentina	2:1	0.25				
	5:1	0.41				
	10:1	0.46				
	Relación de área A/A_o					
Placa con orificio	1.5:1	0.85				
	2:1	3.4				
	4:1	29				
	$\geq 6:1$	$2.78((A \div A_0) - 0.6)^2$				
Ensanchamiento repentino			$(1 - (A_1 \div A_2))^2$			
Codo a inglete a 90° (sin aleta)			1.1			
(con aleta)			0.2			
Contracción general	(ángulo a 30° incluido)	0.02				
	(ángulo a 70° incluido)	0.07				

^a Valores para otras geometrías pueden ser encontradas en el Technical Paper 440, The Crane Company, 1997.

^b Basada en la velocidad de salida V_2

^c Basada en la velocidad de entrada V_1

TABLAS DE PROPIEDADES**Tabla 9 Propiedades del aire a presión atmosférica. Sistema Inglés**

Temperatura (°F)	Densidad (slugs/ft ³)	Viscosidad absoluta (lb·seg/ft ²)	Viscosidad Cinemática (ft ² /seg)	Velocidad del sonido (ft/seg)
-20	0,0028	3,37x10 ⁻⁷	11,9x10 ⁻⁵	1028
0	0,00268	3,38	1,26	1051
20	0,00257	3,5	1,36	1074
40	0,00247	3,62	1,46	1096
60	0,00237	3,74	1,58	1117
68	0,00233	3,81	1,6	1125
80	0,00228	3,85	1,69	1138
100	0,0022	3,96	1,8	1159
120	0,00213	4,07	1,89	1180
160	0,00199	4,23	2,13	1220
200	0,00187	4,5	2,41	1258
300	0,00162	4,98	3,07	1348
400	0,00144	5,26	3,67	1431
1000	0,000844	7,87x10 ⁻⁷	93,2x10 ⁻⁵	1839

Tabla 10 Propiedades del aire a presión atmosférica. Sistema Internacional

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (N·seg/m ²)	Viscosidad Cinemática (m ² /seg)	Velocidad del sonido (m/seg)
-30	1,452	1,56x10 ⁻⁵	1,08x10 ⁻⁵	312
-20	1,394	1,61	1,16	319
-10	1,342	1,67	1,24	325
0	1,292	1,72	1,33	331
10	1,247	1,76	1,42	337
20	1,204	1,81	1,51	343
30	1,164	1,86	1,6	349
40	1,127	1,91	1,69	355
50	1,092	1,95	1,79	360
60	1,06	2	1,89	366
70	1,03	2,05	1,99	371
80	1	2,09	2,09	377
90	0,973	2,13	2,19	382
100	0,946	2,17	2,3	387
200	0,746	2,57	3,45	436
300	0,616	2,96x10 ⁻⁵	4,75x10 ⁻⁵	480

Tabla 11 Viscosidad y densidad del aire a 1 atm

$T, ^\circ C$	$\rho, kg/m^3$	$\mu, N\cdot s/m^2$	$v, m^2/s$	$T, ^\circ F$	$\rho, slug/ft^3$	$\mu, lb\cdot s/ft^2$	$v, ft^2/s$
-40	1,52	$1,51 \times 10^{-5}$	$0,99 \times 10^{-5}$	-40	$2,94 \times 10^{-3}$	$3,16 \times 10^{-7}$	$1,07 \times 10^{-4}$
0	1,29	1,71	1,33	32	2,51	3,58	1,43
20	1,2	1,80	1,50	68	2,34	3,76	1,61
50	1,09	1,95	1,79	122	2,12	4,08	1,93
100	0,946	2,17	2,30	212	1,84	4,54	2,47
150	0,835	2,38	2,85	302	1,62	4,97	3,07
200	0,746	2,57	3,45	392	1,45	5,37	3,71
250	0,675	2,75	4,08	482	1,31	5,75	4,39
300	0,616	2,93	4,75	572	1,20	6,11	5,12
400	0,525	3,25	6,20	752	$1,02 \times 10^{-3}$	6,79	6,67
500	0,457	3,55	$7,77 \times 10^{-5}$	932	$8,90 \times 10^{-4}$	$7,41 \times 10^{-7}$	$8,37 \times 10^{-4}$

Curva de ajuste sugerida para el aire:

$$\rho = P/RT, \quad R_{\text{aire}} = 287 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\text{Ley Potential: } (\mu/\mu_o) \approx (T/T_o)^{0.7}$$

$$\text{Ley de Sutherland: } (\mu/\mu_o) \approx (T/T_o)^{1.5} (T_o + S)/(T + S)$$

$$S_{\text{aire}} = 110.4$$

$$T_o = 273K$$

$$\mu_o = 1,71 \times 10^{-5} \text{ Kg/(m}\cdot\text{s)}$$

Tabla 12 Propiedades de gases comunes a 1 atm y 20 °C (68°F)

Gas	Peso molecular	R, m ² /(s ² ·s)	ρg, N/m ³	μ, N·s/m ²	Relación de calores específicos	Exponente de la ley potencial, n*
H ₂	2,016	4124	0,822	9,05x10 ⁻⁶	1,41	0,68
He	4,003	2077	1,63	1,97x10 ⁻⁵	1,66	0,67
H ₂ O	18,02	461	7,35	1,02	1,33	1,15
Ar	39,944	208	16,3	2,24	1,67	0,72
Aire seco	28,96	287	11,8	1,80	1,4	0,67
CO ₂	44,01	189	17,9	1,48	1,3	0,79
CO	28,01	297	11,44	1,82	1,4	0,71
N ₂	28,02	297	11,4	1,76	1,4	0,67
O ₂	32	260	13,1	2,00	1,4	0,69
NO	30,01	277	12,1	1,90	1,4	0,78
N ₂ O	44,02	189	17,9	1,45	1,31	0,89
Cl ₂	70,91	117	28,9	1,03	1,34	1
CH ₄	16,04	518	6,54	1,34x10 ⁻⁵	1,32	0,87

* La ley potencial, Ecuación (1,27), $\mu/\mu_{293K} \approx (T/293)^n$, ajusta las propiedades de estos gases con un error inferior al ± 4 por 100 en el intervalo $250 \leq T \leq 1000K$. Las temperaturas deben estar expresadas en grados Kelvin.

Tabla 13 Propiedades del agua. Sistema Inglés

<i>Temperatura</i> (°F)	<i>Densidad</i> (slug/ft ³)	<i>Peso específico</i> (lb/ft ³)	<i>Viscosidad</i> (lb·s/ft ²)	<i>Viscosidad Cinemática</i> (ft ² /s)	<i>Módulo volumétrico</i> (lb/in ²)	<i>Tensión Superficial</i> (lb/ft)	<i>Presión del vapor</i> (lb/in ²)
32	1,94	62,4	3,75x10 ⁻⁵	1,93x10 ⁻⁵	293000	0,518x10 ⁻²	0,089
40	1,94	62,4	3,23	1,66	294000	0,514	0,12
50	1,94	62,4	2,74	1,41	306000	0,509	0,178
60	1,94	62,4	2,36	1,22	311000	0,504	0,256
70	1,94	62,4	2,05	1,06	320000	0,5	0,34
80	1,93	62,1	1,8	0,93	322000	0,492	0,507
90	1,93	62,1	1,6	0,826	323000	0,486	0,698
100	1,93	62,1	1,42	0,739	327000	0,48	0,949
120	1,92	61,8	1,17	0,609	333000	0,465	1,69
140	1,91	61,5	0,98	0,514	330000	0,454	2,89
160	1,9	61,1	0,84	0,442	326000	0,441	4,74
180	1,88	60,5	0,73	0,385	318000	0,426	7,51
200	1,87	60,2	0,64	0,341	308000	0,412	11,53
212	1,86	59,8	0,59x10 ⁻⁵	0,319x10 ⁻⁵	300000	0,404x10 ⁻²	14,70

Tabla 14 Propiedades del agua. Sistema Internacional

<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Densidad</i> ρ (kg/m ³)	<i>Peso específico</i> γ (N/m ³)	<i>Viscosidad</i> μ (N·s/m ²)	<i>Viscosidad Cinemática</i> ν (m ² /s)	<i>Módulo volumétrico</i> β (Pa)	<i>Tensión Superficial</i> σ (N/m)	<i>Presión del vapor</i> (k Pa)
0	999,9	9809	1,792x10 ⁻³	1,792x10 ⁻⁶	204x10 ⁷	7,62x10 ⁻²	0,61
5	1000	9810	1,519	1,519	206	7,54	0,872
10	999,7	9807	1,308	1,308	211	7,48	1,13
15	999,1	9801	1,14	1,141	214	7,41	1,6
20	998,2	9792	1,005	1,007	220	7,36	2,34
30	995,7	9768	0,801	0,804	223	7,18	4,24
40	992,2	9733	0,656	0,661	227	7,01	7,38
50	988,1	9693	0,549	0,556	230	6,82	12,3
60	983,2	9645	0,469	0,477	228	6,68	19,9
70	977,8	9592	0,406	0,415	225	6,5	31,2
80	971,8	9533	0,357	0,367	221	6,3	47,3
90	965,3	9470	0,317	0,328	216	6,12	70,1
100	958,4	9402	0,284x10 ⁻³	0,296x10 ⁻⁶	207x10 ⁷	5,94x10 ⁻²	101,3

Tabla 15 Viscosidad y densidad del agua a 1 atm

$T, ^\circ C$	$\rho, kg/m^3$	$\mu, N \cdot s/m^2$	$v, m^2/s$	$T, ^\circ F$	$\rho, slug/ft^3$	$\mu, lb \cdot s/ft^2$	$v, ft^2/s$
0	1000	1,788x10 ⁻³	1,788x10 ⁻⁶	32	1,940	3,73x10 ⁻⁵	1,925x10 ⁻⁵
10	1000	1,307	1,307	50	1,940	2,73	1,407
20	998	1,003	1,005	68	1,937	2,09	1,082
30	996	0,799	0,802	86	1,932	1,67	0,864
40	992	0,657	0,662	104	1,925	1,37	0,713
50	988	0,548	0,555	122	1,917	1,14	0,597
60	983	0,467	0,475	140	1,918	0,975	0,511
70	978	0,405	0,414	158	1,897	0,846	0,446
80	972	0,355	0,365	176	1,886	0,741	0,393
90	965	0,316	0,327	194	1,873	0,66	0,352
100	958	0,283x10 ⁻³	0,295x10 ⁻⁶	212	1,859	0,591x10 ⁻⁵	0,318x10 ⁻⁵

Curva de ajuste sugerida para el agua en el intervalo de $0 \leq T \leq 100 \text{ } ^\circ C$:

$$\rho (Kg/m^3) \approx 1000 - 0,0178|T \text{ } ^\circ C - 4 \text{ } ^\circ C|^{1,7} \pm 0,2\%$$

$$\ln (\mu/\mu_0) \approx -1,704 - 5,306z + 7,003z^2$$

$$z = 273K/T(K) \quad \mu_0 = 1,788x10^{-3} \text{ } Kg/(m \cdot s)$$

Tabla 16 Propiedades de líquidos comunes a 1 atm y 20 °C (°F)

Líquido	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{kg/(m}\cdot\text{s)}$	Tensión superficial $\sigma, \text{N/m}^*$	Presión de vapor $P_v, \text{N/m}^2$	Módulo de compresibilidad N/m^2	Parámetro de viscosidad, C'
Amoniaco	608	2,20x10 ⁻⁴	2,13x10 ⁻²	9,10x10 ⁻⁵		1,05
Benceno	881	6,51x10 ⁻⁴	2,88x10 ⁻²	1,01x10 ⁻⁴	1,4x10 ⁻⁹	4,34
Tetra cloruro de carbono	1590	9,67x10 ⁻⁴	2,70x10 ⁻²	1,20x10 ⁻⁴	9,65x10 ⁻⁸	4,45
Etanol	789	1,20x10 ⁻³	2,28x10 ⁻²	5,7x10 ⁻²	9,0x10 ⁻⁸	5,72
Etilenglicol	1117	2,14x10 ⁻²	4,84x10 ⁻²	1,2x10 ⁻¹		11,7
Freón 12	1327	2,62x10 ⁻⁴				1,76
Gasolina	680	2,92x10 ⁻⁴	2,16x10 ⁻²	5,51x10 ⁻⁴	9,58x10 ⁻⁸	3,68
Glicerina	1260	1,49	6,33x10 ⁻²	1,4x10 ⁻²	4,34x10 ⁻⁹	28,0
Queroseno	804	1,92x10 ⁻³	2,8x10 ⁻²	3,11x10 ⁻³	1,6x10 ⁻⁹	5,56
Mercurio	13550	1,56x10 ⁻³	4,84x10 ⁻¹	1,1x10 ⁻³	2,55x10 ⁻¹⁰	1,07
Metanol	791	5,98x10 ⁻⁴	2,25x10 ⁻²	1,34x10 ⁻⁴	8,3x10 ⁻⁸	4,63
Aceite SAE 10W	870	1,04x10 ^{-1\\$}	3,6x10 ⁻²		1,31x10 ⁻⁹	15,7
Aceite SAE 10W30	876	1,7x10 ^{-1\\$}				14,0
Aceite SAE 30W	891	2,9x10 ^{-1\\$}	3,5x10 ⁻²		1,38x10 ⁻⁹	18,3
Aceite SAE 50W	902	8,6x10 ^{-1\\$}				20,2
Agua	998	1,00x10 ⁻³	7,28x10 ⁻²	2,34x10 ⁻³	2,19x10 ⁻⁹	Tabla A,1
Agua de mar (30%)	1025	1,07x10 ⁻³	7,28x10 ⁻³	2,34x10 ⁻³	2,33x10 ⁻⁹	7,28

* En contacto con aire.

La variación de la viscosidad con la temperatura para estos líquidos puede ajustarse con la relación empírica.

$\mu/(\mu_{20^\circ\text{C}}) \approx \exp[C(293K/T - 1)]$
Con una precisión del ± 6 por 100 en el intervalo $0 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$.

\\$ Valores representativos. Las clasificaciones de aceites SAE permiten variaciones de hasta el ± 50 por 100, especialmente a bajas temperaturas

Tabla 17 Viscosidad y viscosidad cinemática de ocho fluidos a 1 atm y 20°C.

Fluido	$\mu, \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ †	Relación $\mu/\mu(H_2)$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$ †	Relación $\nu/\nu(Hg)$
Hidrógeno	$8,8 \times 10^{-6}$	1,0	0,084	$1,05 \times 10^{-4}$	920
Aire	$1,8 \times 10^{-5}$	2,1	1,2	$1,51 \times 10^{-5}$	130
Gasolina	$2,9 \times 10^{-4}$	33	680	$4,22 \times 10^{-7}$	3,7
Agua	$1,0 \times 10^{-3}$	114	998	$1,01 \times 10^{-6}$	8,7
Alcohol etílico	$1,2 \times 10^{-3}$	135	789	$1,52 \times 10^{-6}$	13
Mercurio	$1,5 \times 10^{-3}$	170	13580	$1,16 \times 10^{-7}$	1,0
Aceite SAE 30	0,29	33000	891	$3,25 \times 10^{-4}$	2850
Glicerina	1,5	170000	1264	$1,18 \times 10^{-3}$	10300

† $1 \text{ Kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) = 0,0209 \text{ slug}/(\text{ft}\cdot\text{s})$; $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10,76 \text{ ft}^2/\text{s}$

Tabla 18 Tensión superficial, presión de vapor y velocidad del sonido del agua

$T, ^\circ\text{C}$	Tensión superficial $\sigma, \text{N}/\text{m}$	Presión de vapor P_v, kPa	$a, \text{m}/\text{s}$
0	0,0756	0,611	1402
10	0,0742	1,227	1447
20	0,0728	2,337	1482
30	0,0712	4,242	1509
40	0,0696	7,375	1529
50	0,0679	12,34	1542
60	0,0662	19,92	1551
70	0,0644	31,16	1553
80	0,0626	47,35	1554
90	0,0608	70,11	1550
100	0,0589	101,3	1543
120	0,055	198,5	1518
140	0,0509	361,3	1483
160	0,0466	617,8	1440
180	0,0422	1002	1389
200	0,0377	1554	1334
220	0,0331	2318	1268
240	0,0284	3344	1192
260	0,0237	4688	1110
280	0,019	6412	1022
300	0,0144	8581	920
320	0,0099	11274	800
340	0,0056	14586	630
360	0,0019	18651	370
374*	0*	22090*	0*

Donde * : Punto crítico.

Tabla 19 Propiedades de la atmósfera estándar

<i>z, m</i>	<i>T, K</i>	<i>P, Pa</i>	<i>ρ kg/m³</i>	<i>a, m/s</i>
-500	291,41	107508	1,2854	342,2
0	288,16	101350	1,2255	340,3
500	284,91	95480	1,1677	338,4
1000	281,66	89889	1,1120	336,5
1500	278,41	84565	1,0583	334,5
2000	275,16	79500	1,0067	332,6
2500	271,91	74684	0,9570	330,6
3000	268,66	70107	0,9092	328,6
3500	265,41	65759	0,8633	326,6
4000	262,16	61633	0,8191	324,6
4500	258,91	57718	0,7768	322,6
5000	255,66	54008	0,7361	320,6
5500	252,41	50493	0,6970	318,5
6000	249,16	47166	0,6596	316,5
6500	245,91	44018	0,6237	314,4
7000	242,66	41043	0,5893	312,3
7500	239,41	38233	0,5564	310,2
8000	236,16	35581	0,5250	308,1
8500	232,91	33080	0,4949	306,0
9000	229,66	30723	0,4661	303,8
9500	226,41	28504	0,4387	301,7
10000	223,16	26416	0,4125	299,5
10500	219,91	24455	0,3875	297,3
11000	216,66	22612	0,3637	295,1
11500	216,66	20897	0,3361	295,1
12000	216,66	19312	0,3106	295,1
12500	216,66	17847	0,2870	295,1
13000	216,66	16494	0,2652	295,1
13500	216,66	15243	0,2451	295,1
14000	216,66	14087	0,2265	295,1
14500	216,66	13018	0,2094	295,1
15000	216,66	12031	0,1935	295,1
15500	216,66	11118	0,1788	295,1
16000	216,66	10275	0,1652	295,1
16500	216,66	9496	0,1527	295,1
17000	216,66	8775	0,1411	295,1
17500	216,66	8110	0,1304	295,1
18000	216,66	7495	0,1205	295,1
18500	216,66	6926	0,1114	295,1
19000	216,66	6401	0,1029	295,1
19500	216,66	5915	0,0951	295,1
20000	216,66	6467	0,0879	295,1

22000	218,6	4048	0,0645	296,4
24000	220,6	2972	0,0469	297,8
26000	222,5	2189	0,0343	299,1
28000	224,5	1616	0,0251	300,4
30000	226,5	1197	0,0184	301,7
40000	250,4	287	0,0040	317,2
50000	270,7	80	0,0010	329,9
60000	255,7	22	0,0003	320,6
70000	219,7	6	0,0001	297,2

Hasta una altura de 11000 *m* (unos 36000 *pies*) se puede usar la siguiente ecuación para calcular la presión atmosférica en la troposfera

$$P_{atm} = P_a \left(1 - \frac{Bz}{T_0}\right)^{g/RB}$$

Con $P_a = 101.350 \text{ KPa}$, presión atmosférica estándar

$B = 0.003566 \text{ R/pie} = 0.00650 \text{ K/m}$ gradiente térmico

$T_0 = 518.69 \text{ R} = 218.16 \text{ K}$ temperatura absoluta a nivel del mar

$z = 0$ a nivel del mar

Tabla 20 Calores Específicos de gas ideal del aire a diversas temperaturas

Aire			
T, K	$C_p, \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	$C_v, \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	k
250	1,003	0,716	1,4008
300	1,005	0,718	1,3997
350	1,008	0,721	1,3981
400	1,013	0,726	1,3953
450	1,020	0,733	1,3915
500	1,029	0,742	1,3868
550	1,040	0,753	1,3811
600	1,051	0,764	1,3757
650	1,063	0,776	1,3698
700	1,075	0,788	1,3642
750	1,087	0,800	1,3588
800	1,099	0,812	1,3534
900	1,121	0,834	1,3441
1000	1,142	0,855	1,3357

Bibliografía

- Alarcón, Gabriel. Turbomáquinas. Publicaciones de La Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Sf.
- Fox, Robert y MacDonald, Alan. Introducción a la mecánica de fluidos. Cuarta edición. McGraw-Hill. Mexico, 1997.
- White, Frank M. Mecánica de Fluidos. Quinta edición. McGraw-Hill. España, 2004.
- Potter, Merle y Wiggert, David. Mecánica de Fluidos. Tercera edición. THOMSON. México, 2003.
- Polo Encinas, Manuel. Turbomáquinas Hidráulicas, Principios Fundamentales. Editorial LIMUSA. México, 1976.
- Yunus A. Cengel. Termodinámica 6ta Edición. McGraw-Hill. Mexico, 1997.
- McNaughton Kenneth. Bombas, selección, uso y mantenimiento. 1ra edición. McGraw-Hill. Mexico, 1989.
- Japikse, David y Baines Nicholas C. Introduction to turbomachinery. 2da Edición. Edwards Brothers Incorporated. USA, 1997.
- Sayers, A. T. Hydraulic and compressible flow turbomachines. 1ra edición. McGraw-Hill. England, 1990.
- Fuchslocher-Schulz. Bombas, funcionamiento, cálculo y construcción. Décima edición. Editorial Labor S.A. España, 1964.