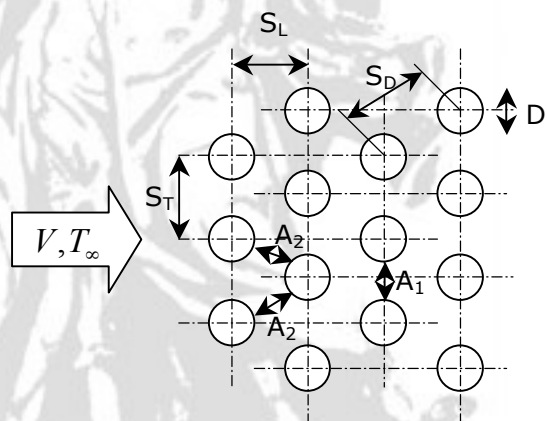
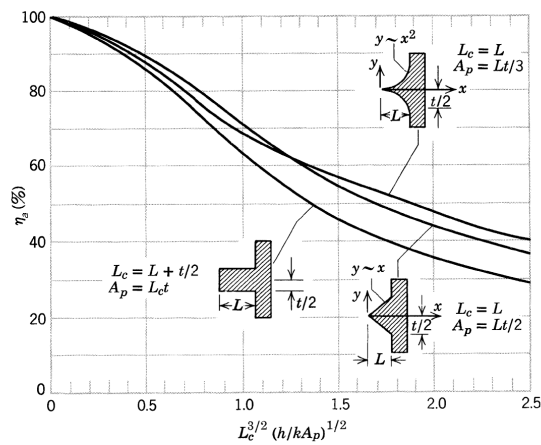
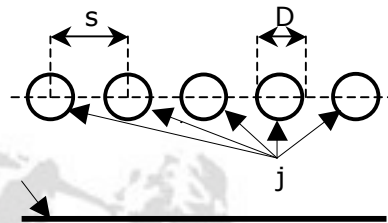


Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor

Versión 3.3 (septiembre de 2013)



Autor: Juan Francisco Coronel Toro
Grupo de Termotecnia
Dpto. de Ingeniería Energética
Universidad de Sevilla

Este documento está basado en versiones anteriores desarrolladas por:

- ☐ D. Ramón Velázquez Vila
- ☐ D. José Guerra Macho
- ☐ D. Servando Álvarez Domínguez
- ☐ D. José Luis Molina Félix
- ☐ D. David Velázquez Alonso
- ☐ D. Luis Pérez-Lombard
- ☐ D. Juan F. Coronel Toro

Todos ellos pertenecientes al Grupo de Termotecnia.

Parte de la información ha sido tomada de las siguientes referencias :

- ☐ INCROPERA, F.P. y DEWITT, D.P. *Fundamentos de la Transferencia de Calor*. 4ª ed. Prentice Hall, México, 1999. ISBN 970-17-0170-4.
- ☐ HOLMAN, J.P. *Transferencia de Calor*. 8ª ed. McGraw-Hill Interamericana de España S.A.U., 1998. ISBN 84-481-2040-X.
- ☐ MILLS, A.F. *Transferencia de Calor*. Irwin, 1995. ISBN 84-8086-194-0.
- ☐ CHAPMAN, A.J. *Transmisión de Calor*. 3ª ed. Bellisco. Librería Editorial., 1990. ISBN 84-85198-45-5.
- ☐ KLEIN, S.A. y ALVARADO, F.L., "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Índice

1. Sistema internacional de unidades (SI)	4
2. Tablas de conversión de unidades.....	5
2.1. Longitud.....	5
2.2. Superficie.....	5
2.3. Volumen.....	5
2.4. Masa.....	5
2.5. Velocidad	5
2.6. Presión.....	6
2.7. Energía	6
2.8. Potencia.....	6
2.9. Coeficiente global de transferencia – Coef. de película	6
2.10. Caudal volumétrico	6
2.11. Calor específico	7
2.12. Temperatura	7
3. Constantes y valores muy usados	7
3.1. Constantes en el SI.....	7
3.2. Números adimensionales para transmisión de calor	7
3.3. Valores aproximados para propiedades del aire y del agua	8
4. Propiedades termofísicas de la materia.....	9
Tabla 4.1: Propiedades termofísicas de sólidos metálicos a 300 K	9
Tabla 4.2: Propiedades termofísicas sólidos no metálicos a 300 K	10
Tabla 4.3: Propiedades termofísicas de otros materiales	10
Tablas 4.4: Propiedades de gases a presión atmosférica	11
Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica	11
Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica (cont.)	12
Tabla 4.4.2: Propiedades del Amoníaco a presión atmosférica	13
Tabla 4.4.3: Propiedades del CO ₂ a presión atmosférica	13
Tabla 4.4.4: Propiedades del CO a presión atmosférica.....	14
Tabla 4.4.5: Propiedades del vapor de agua a presión atmosférica.....	14
Tabla 4.5: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica.....	15
Tabla 4.6: Propiedades termofísicas del agua saturada.....	16
5. Transmisión de calor por conducción	17
Ecuación 5.1: Ley de Fourier	17
Ecuación 5.2: Ecuación general de transmisión de calor.....	17
Tabla 5.3: Conducción unidimensional en régimen permanente sin generación y con k cte.	18
Tabla 5.4: Distribución de temperaturas y transmisión de calor para aletas de sección transversal constante.....	18
Tabla 5.5: Eficiencia de formas comunes de aletas	19
Tabla 5.5: Eficiencia de formas comunes de aletas (cont.)	20
Gráfica 5.6: Eficiencia de aletas rectas	21
6. Transmisión de calor por convección	22
Tabla 6.1: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, placa plana, flujo paralelo	22
Tabla 6.2: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, conducto circular, flujo perpendicular	23
Tabla 6.3: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, esfera.....	23
Tabla 6.4: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, conducto no circular, flujo perpendicular	24
Tabla 6.5: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, banco de tubos, flujo perpendicular	25
Tabla 6.6: Correlaciones conv. forzada, flujo interno, conducto circular	27
Tabla 6.7: Correlaciones conv. forzada, flujo interno, conducto no circular	28
Tabla 6.8: Correlaciones conv. libre, flujo externo, placa plana vertical, inclinada y horizontal	29
Tabla 6.9: Correlaciones conv. libre, flujo externo, cilindro largo horizontal.....	30
Tabla 6.10: Correlaciones conv. libre, flujo externo, esfera	30
Tabla 6.11: Correlaciones convección libre, recinto rectangular	31
Tabla 6.12: Correlaciones convección libre, recintos cilíndricos y esféricos concéntricos	32
Tabla 6.13: Correlaciones condensación	33
Tabla 6.14: Correlaciones ebullición, flujo externo	34
Tabla 6.15: Correlaciones ebullición, flujo interno	35
Gráfica 6.16: Ábaco de Moody	37
7. Transmisión de calor por radiación.....	38
Ecuaciones 7.1: Intercambio radiante en recintos.....	38
Esquema 7.2: Analogía eléctrica para radiación	38
Tabla 7.3: Funciones de radiación del cuerpo negro	39
Tabla 7.4: Factores de forma para geometrías bidimensionales	40
Gráfica 7.5: Factores de forma para discos coaxiales paralelos	41
Gráfica 7.6: Factores de forma para rectángulos paralelos alineados	42
Gráfica 7.7: Factores de forma para rectángulos perpendiculares con un lado común	42

1. Sistema internacional de unidades (SI)

El sistema SI (Sistema Internacional), es un sistema coherente de unidades, es decir, está basado en la definición de un cierto número de unidades básicas a partir de las cuales se obtiene unidades derivadas mediante simple multiplicación y división de aquéllas, sin que se necesite introducir ningún factor numérico. Este sistema de unidades fue propuesto a la Conferencia General de Pesos y Medidas de 1960, y su empleo se ha sido extendiendo, a nivel mundial, en forma cada vez más intensa.

Cantidad Física	Nombre	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	Kg
Tiempo	Segundo	s
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Corriente eléctrica	Amperio	A
Intensidad luminosa	Candela	Cd

Tabla 1.1: Unidades base del SI.

Cantidad Física	Nombre	Símbolo	Expresión en unidades base SI
Frecuencia	Hertzio	Hz	1/s
Fuerza	Newton	N	kg·m/s ²
Presión	Pascal	Pa	N/m ² = kg/(m·s ²)
Energía, trabajo, calor	Julio	J	N·m = kg·m ² /s ²
Potencia	Vatio	W	J/s = kg·m ² /s ³
Potencial eléctrico	Voltio	V	W/A = kg·m ² /(s ³ ·A)
Resistencia eléctrica	Ohmio	Ω	V/A = kg·m ² /(s ³ ·A ²)

Tabla 1.2: Unidades derivadas con nombre propio del SI.

Existen dos excepciones muy usadas que son: Los grados centígrados o Celsius para la temperatura ($t(^{\circ}\text{C}) = t(\text{K}) - 273.15$) y los litros para el volumen ($V(\text{L}) = V(\text{m}^3) \cdot 1000$).

Cuando se tiene cantidades muy grandes o muy pequeñas se puede agregar un prefijo a la unidad.

Factor	Prefijo	Símbolo
1.000.000.000.000 = 10^{12}	Tera	T
1.000.000.000 = 10^9	Giga	G
1.000.000 = 10^6	Mega	M
1.000 = 10^3	Kilo	k
100 = 10^2	Hecto	h
10 = 10^1	Deca	da
0,1 = 10^{-1}	Deci	d
0,01 = 10^{-2}	Centi	c
0,001 = 10^{-3}	Mili	m
0,000 001 = 10^{-6}	Micro	μ
0,000 000 001 = 10^{-9}	Nano	n
0,000 000 000 001 = 10^{-12}	Pico	p

Tabla 1.3: Prefijos del SI.

El valor de referencia para la entalpía en el SI suele tomarse como 200 kJ/kg para líquido saturado a 0°C, y la entropía 1 kJ/kg·K en las mismas condiciones.

2. Tablas de conversión de unidades

Ejemplo de uso de las tablas de conversión de unidades:

Para saber cuantos pies (ft) son un metro, en la tabla de longitud se entra por la fila de "1 m" y se lee en la columna "Pie (ft)" entonces: 1 m = 3.28084 ft. Para saber el contrario, es decir, cuantos metros son un pie, se entra por la fila de "1 ft" y se lee en la columna "Metro (m)" entonces: 1 ft = 0,3048 m

2.1. Longitud

Para recordar: 1 in = 2,54 cm; 1 m = 3,28 ft

Unidad	Metro (m)	Pulgada (in)	Pie (ft)
1 m	1	39,3701	3,28084
1 in	0,0254	1	0,08333
1 ft	0,3048	12	1

1 milla terrestre = 1609 m

1 milla marina = 1852 m

2.2. Superficie

Para recordar: 1 m² = 10,76 ft²

Unidad	Metro ² (m ²)	Pulgada ² (in ²)	Pie ² (ft ²)
1 m ²	1	1550,0031	10,76391
1 in ²	6,4516·10 ⁻⁴	1	6,9444·10 ⁻³
1 ft ²	0,0929034	144	1

2.3. Volumen

Para recordar: 1 galón = 3,78 L

Unidad	Metro ³ (m ³)	Litro (L)	Pie ³ (ft ³)	Galón
1 m ³	1	1000	35,31467	264,17205
1 L	0,001	1	0,0353147	0,264172
1 ft ³	0,0283168	28,3168	1	7,4805195
1 galón	3,7854·10 ⁻³	3,785412	0,1336806	1

2.4. Masa

Para recordar: 1 kg = 2,2 lb

Unidad	Libra (lb)	gramo (g)	kilogramo (kg)	Tonelada (t)
1 lb	1	453,6	0,4536	0,4536·10 ⁻⁶
1 g	2,205·10 ⁻³	1	0,001	10 ⁻⁶
1 kg	2,205	1000	1	0,001
1 t	2205	10 ⁶	1000	1

2.5. Velocidad

Para recordar: 1 m/s = 3,6 km/h

Unidad	m/s	km/h	ft/s	ft/h
1 m/s	1	3,6	3,2808	111810,8
1 km/h	0,277	1	0,91134	3280,83
1 ft/s	0,3048	1,0973	1	3600
1 ft/h	8,466·10 ⁻⁵	3,048·10 ⁻⁴	2,777·10 ⁻⁴	1

1 mph (millas por hora) = 0.44704 m/s = 1,6093 km/h

1 nudo = 0.51444 m/s = 1.8520 km/h

2.6. Presión

Para recordar: 1 atm = 101,325 kPa; 1 m H₂O = 9,81 kPa; 1 bar = 100 kPa

Unidad	kPa	kg/cm ²	mm Hg	m H ₂ O	bar
1 kPa	1	0,0101972	7,5006278	0,1019745	0,01
1 kg/cm ²	98,0665	1	735,560217	10,00028	0,980665
1 mm Hg	0,1333222	1,3595·10 ⁻³	1	0,0135955	1,3332·10 ⁻³
1 m H ₂ O	9,8063754	0,0999997	73,5539622	1	0,0980638
1 bar	100	1,0197162	750,062679	10,1974477	1

1 kPa = 1000 N/m²

1 atmósfera = 101,325 kPa = 760 mm Hg

1 mm H₂O = 0,0098063 kPa

1 psi = 6,89476 kPa

1 ft H₂O = 2,98898 kPa

1 in H₂O = 0,249082 kPa

2.7. Energía

Para recordar: 1 kcal = 4,186 kJ; 1 Btu = 1,055 kJ; 1 kWh = 3600 kJ

Unidad	Kilocaloría (kcal)	British Thermal Unit (Btu)	kilojulio (kJ)	Kilovatio hora (kWh)
1 kcal	1	3,9683207	4,1868	0,001163
1 Btu	0,2519958	1	1,0550559	2,9307·10 ⁻⁴
1 kJ	0,2388459	0,9478171	1	2,777·10 ⁻⁴
1 kWh	859,84523	3412,1416	3600	1

1 CVh = 0,7355 kWh = 2647,7955 kJ 1 termia = 1000 kcal

1 Tec (Tonelada equivalente de carbón) = 29,288·10⁶ kJ = 8135 kWh

1 Tep (Tonelada equivalente de petróleo) = 41,84·10⁶ kJ = 11622 kWh

2.8. Potencia

Para recordar: 1 kW = 860 kcal/h; 1 kW = 3,412 kBtu/h; 1 CV = 736 W

Unidad	Kilovatio (kW)	kcal/h	Btu/h	Horsepower (hp)	Caballo de vapor (CV)
1 kW	1	859,84523	3412,1416	1,3410221	1,3596216
1 kcal/h	1,163·10 ⁻³	1	3,9683297	1,5596·10 ⁻³	1,5812·10 ⁻³
1 Btu/h	2,9307·10 ⁻⁴	0,2519958	1	3,9301·10 ⁻⁴	3,9847·10 ⁻⁴
1 hp	0,7457	641,18648	2544,4336	1	1,0138697
1 CV	0,7354988	632,41509	2509,6529	0,986301	1

1 ton (Tonelada de refrigeración) = 3,5168 kW = 12000 Btu/h

2.9. Coeficiente global de transferencia - Coef. de película

Para recordar: 1 W/m²·K = 0,860 kcal/h·m²°C

Unidad	kcal/h·m ² °C	W/m ² ·K	Btu/h·ft ² °F
1 kcal/h·m ² °C	1	1,163	0,2048
1 W/m ² ·K	0,85984523	1	0,1761
1 Btu/h·ft ² °F	4,882	5,678	1

2.10. Caudal volumétrico

Para recordar: 1 m³/s = 3600 m³/h; 1 cfm = 1,7 m³/h

Unidad	m ³ /s	m ³ /h	L/h	ft ³ /min (cfm)	Galón/min (gpm)
1 m ³ /s	1	3600	3600000	2118,88	15850,3
1 m ³ /h	2,7778·10 ⁻⁴	1	1000	0,5886	4,4029
1 L/h	2,7778·10 ⁻⁷	0,001	1	5,8856·10 ⁻⁴	0,0044
1 cfm	4,7195·10 ⁻⁴	1,6989	1698,9	1	7,4805
1 gpm	6,3090·10 ⁻⁵	0,2271	227,27	0,1337	1

1 L/s = 3600 L/h = 15.84 gpm

2.11. Calor específico

$$1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 1 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F} = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} = 4,186 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

2.12. Temperatura

$$T(^{\circ}\text{C}) = (T(^{\circ}\text{F}) - 32)/1,8$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67$$

3. Constantes y valores muy usados

3.1. Constantes en el SI

Aceleración de la gravedad (nivel del mar):

Presión atmosférica estándar:

Constante universal de los gases:

Constante de los gases para el aire:

Número de Avogadro:

Constante de Planck:

Constante de Boltzmann:

Velocidad de la luz en el vacío:

Constante de Stefan-Boltzmann:

Constantes de radiación del cuerpo negro:

$$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$$

$$P_{\text{atm}} = 101,325 \text{ kPa}$$

$$\mathcal{R} = 8,315 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$$

$$\mathcal{R}_{\text{aire}} = 287,055 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$\mathcal{N} = 6,024 \cdot 10^{23} \text{ moléculas/mol}$$

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s/molécula}$$

$$k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}\cdot\text{molécula}$$

$$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$C_1 = 3,7420 \cdot 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = 1,4388 \cdot 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

$$C_3 = 2897,8 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

3.2. Números adimensionales para transmisión de calor

Nº de Biot: $Bi = \frac{hL}{k_s}$

Coef. de fricción: $C_f = \frac{\tau_s}{\rho V^2 / 2}$

Nº de Euler: $Eu = \frac{p}{\rho V}$

Factor de fricción: $f = \frac{\Delta p}{(L/D)(\rho u_m^2 / 2)}$

Nº de Graetz: $Gz = RePr \frac{D}{L}$

Factor j Colburn: $j_H = StPr^{2/3}$

Nº de Lewis: $Le = \frac{\alpha}{D_{AB}}$

Nº de Peclet: $Pe = RePr = \frac{VL}{\alpha}$

Nº de Reynolds: $Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$

Nº de Schmidt: $Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$

Nº de Stanton: $St = \frac{h}{\rho V c_p} = \frac{Nu}{RePr}$

Nº de Bond: $Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)L^2}{\sigma}$

Nº de Eckert: $Ec = \frac{V^2}{c_p(T_s - T_\infty)}$

Nº de Fourier: $Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$

Nº de Froude: $Fr = \frac{V^2}{gL}$

Nº de Grashof: $Gr = \frac{g\beta|T_s - T_\infty|L^3}{\nu^2}$

Nº de Jakob: $Ja = \frac{c_p(T_s - T_{\text{sat}})}{h_{fg}}$

Nº de Nusselt: $Nu = \frac{hL}{k_f}$

Nº de Prandtl: $Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$

Nº de Rayleigh: $Ra = \frac{g\beta|T_s - T_\infty|L^3}{\alpha \nu}$

Nº de Sherwood: $Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}}$

Nº de Weber: $We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$

3.3. Valores aproximados para propiedades del aire y del agua

Densidad del agua:	$\rho_w = 1000 \text{ kg / m}^3$
Densidad del aire:	$\rho_a = 1,2 \text{ kg / m}^3$
Calor específico del agua líquida:	$c_w = 4,18 \text{ kJ / kg}\cdot\text{K}$
Calor específico a presión cte del aire:	$c_{p,a} = 1 \text{ kJ / kg}\cdot\text{K}$
Calor específico a volumen cte del aire:	$c_{v,a} = 0,717 \text{ kJ / kg}\cdot\text{K}$
Calor específico a presión cte del vapor de agua:	$c_{p,va} = 1,8 \text{ kJ / kg}\cdot\text{K}$
Masa molecular del aire seco:	$M_a = 28,9645 \text{ kg/mol}$
Masa molecular del agua:	$M_w = 18,01528 \text{ kg/mol}$
Calor latente de vaporización del agua:	$\Delta h_{l-g,w} = 2500 \text{ kJ / kg}$

4. Propiedades termofísicas de la materia

Tabla 4.1: Propiedades termofísicas de sólidos metálicos a 300 K

Descripción	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Acero puro	7870	447	80.2	23.1
Acero al carbono	7854	434	60.5	17.7
Acero al carbono-silicio	7817	446	51.9	14.9
Acero al carbono-Manganeso-silicio	8131	434	41.0	11.6
Acero con cromo (bajo)	7822	444	37.7	10.9
Acero inoxidable, AISI 302	8055	480	15.1	3.91
Acero inoxidable, AISI 304	7900	477	14.9	3.95
Acero inoxidable, AISI 316	8238	468	13.4	3.48
Acero inoxidable, AISI 347	7978	480	14.2	3.71
Aluminio puro	2702	903	237	97.1
Aluminio, aleación 2024-T6	2770	875	177	73.0
Aluminio, aleación 195, vaciado	2790	883	168	68.2
Armco (99.75% puro)	7870	447	72.7	20.7
Berilio	1850	1825	200	59.2
Bismuto	9780	122	7.86	6.59
Boro	2500	1107	27.0	9.76
Cadmio	8650	231	96.8	48.4
Cinc	7140	389	116	41.8
Circonio	6570	278	22.7	12.4
Cromo	7160	449	93.7	29.1
Cobalto	8862	421	99.2	26.6
Cobre puro	8933	385	401	117
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	8800	420	52.0	14.0
Bronce fosforoso (89% Cu, 11% Sn)	8780	355	54.0	17.0
Latón (70% Cu, 30% Zn)	8530	380	110	33.9
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	8920	384	23.0	6.71
Estaño	7310	227	66.6	40.1
Germanio	5360	322	59.9	34.7
Iridio	22500	130	147	50.3
Magnesio	1740	1024	156	87.6
Molibdeno	10240	251	138	53.7
Níquel puro	8900	444	90.7	23.0
Nicromio (80% Ni, 20% Cr)	8400	420	12.0	3.40
Inconel X-750	8510	439	11.7	3.10
Niobio	8570	265	53.7	23.6
Oro	19300	129	317	127
Paladio	12020	244	71.8	24.5
Plata	10500	235	429	174
Platino puro	21450	133	71.6	25.1
Platino, aleación (60% Pt, 40% Rh)	16630	162	47.0	17.4
Plomo	11340	129	35.3	24.1
Renio	21100	136	47.9	16.7
Rodio	12450	243	150	49.6
Silicio	2330	712	148	89.2
Tantalio	16600	140	57.5	24.7
Titanio	4500	522	21.9	9.32
Torio	11700	118	54.0	39.1
Tungsteno	19300	132	174	68.3
Uranio	19070	116	27.6	12.5
Vanadio	6100	489	30.7	10.3

Fuente: Frank P. Incropera y David P. DeWitt, "Fundamentos de la Transferencia de Calor" 4ª Ed., Prentice Hall, México, 1999. Apéndice A.

Tabla 4.2: Propiedades termofísicas sólidos no metálicos a 300 K

Descripción	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Azufre	2070	708	0.206	0.141
Bióxido de torio	9110	235	13.0	6.10
Bióxido de titanio, policristalino	4157	710	8.40	2.80
Bióxido de silicio, cristalino	2650	745	10.4/6.21 ^a	
Bióxido de silicio, policristalino	2220	745	1.38	0.834
Boro	2500	1105	27.6	9.99
Carbono amorfo	1950	-	1.60	-
Carbono, diamante tipo IIa	3500	509	2300	1290
Carburo de silicio	3160	675	490	230
Compuesto epóxico de fibra de boro	2080	1122	2.29/0.59 ^b	
Compuesto epóxico de fibra de grafito	1400	935	11.1/0.87 ^b	
Grafito pirolítico	2210	709	1950/5.70 ^c	
Óxido de aluminio, zafiro	3970	765	46.0	15.1
Óxido de aluminio, policristalino	3970	765	36.0	11.9
Óxido de Berilio	3000	1030	272	88.0
Pirocerámico granulada	2600	808	3.98	1.89
Nitruro de Silicio	2400	691	16.0	9.65

^a La primera conductividad es en la dirección paralela al eje del cristal y la segunda perpendicular.

^b La primera conductividad es en la dirección paralela a las fibras y la segunda perpendicular.

^c La primera conductividad es en la dirección paralela a las capas y la segunda perpendicular.

Fuente: Frank P. Incropera y David P. DeWitt, "Fundamentos de la Transferencia de Calor" 4ª Ed., Prentice Hall, México, 1999. Apéndice A.

Tabla 4.3: Propiedades termofísicas de otros materiales

Descripción	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)
Bloque hueco de hormigón	1200	1050	0.49
Contrachapado de madera	700	1600	0.17
Enlucido de yeso	800	920	0.03
Forjado cerámico	1250	880	0.95
Forjado de hormigón	1500	1000	1.38
Hormigón armado (2% acero)	2400	1000	2.5
Hormigón en masa con áridos	2400	1050	1.63
Ladrillo hueco (Fabrica)	1200	920	0.49
Ladrillo macizo (Fabrica)	1800	1380	0.87
Lana mineral MW36	50	1030	0.036
Maderas de coníferas	600	2810	0.14
Mortero de cemento	2000	1050	1.4
Poliestireno Expandido tipo IV	20	1450	0.036
Poliestireno Extruído clase 0.034	25	1450	0.034
Poliuretano conformado Clase C	50	1800	0.025
Poliuretano proyectado	30	1800	0.026
Teja arcilla	2000	800	1
Vidrio para acristalar	2500	750	0.95

Fuente: Base de datos del programa de calificación energética de edificios, CALENER, Grupo de Termotecnia, Universidad de Sevilla, 2002.

Tablas 4.4: Propiedades de gases a presión atmosférica

Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.9825	8.636	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.9656	11.9	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.9753	12.49	6.482	16.62	8.842	0.733
-80	1.828	0.9835	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.9901	13.64	7.85	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.9952	14.2	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.744
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.3	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.8	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.8	0.735
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.4	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.11	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.06	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.3	19.45	28.45	27.05	0.719
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.9996	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.9857	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.9721	1.008	21.39	22	30.24	30.85	0.7132
95	0.9589	1.009	21.6	22.52	30.6	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.9213	1.01	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.8979	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.8756	1.012	23.05	26.32	33.05	37.3	0.7057
140	0.8544	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.8343	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027
160	0.815	1.016	24.24	29.74	35.11	42.4	0.7014
170	0.7966	1.017	24.63	30.92	35.79	44.15	0.7003
180	0.779	1.019	25.01	32.11	36.46	45.92	0.6992
190	0.7622	1.021	25.39	33.32	37.13	47.71	0.6983
200	0.7461	1.023	25.77	34.54	37.79	49.53	0.6974
210	0.7306	1.025	26.14	35.78	38.45	51.36	0.6967
220	0.7158	1.027	26.51	37.04	39.1	53.21	0.696
230	0.7016	1.029	26.88	38.31	39.75	55.08	0.6955
240	0.6879	1.031	27.24	39.6	40.4	56.97	0.695
250	0.6748	1.033	27.6	40.9	41.04	58.88	0.6946
260	0.6621	1.035	27.95	42.22	41.67	60.81	0.6942
270	0.6499	1.037	28.3	43.55	42.31	62.75	0.694
280	0.6382	1.04	28.65	44.9	42.93	64.72	0.6938
290	0.6269	1.042	29	46.26	43.56	66.69	0.6936
300	0.6159	1.044	29.34	47.64	44.18	68.69	0.6935

Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica (cont.)

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
310	0.6054	1.047	29.68	49.03	44.79	70.7	0.6934
320	0.5951	1.049	30.01	50.43	45.4	72.73	0.6934
330	0.5853	1.051	30.35	51.85	46.01	74.77	0.6935
340	0.5757	1.054	30.68	53.29	46.61	76.83	0.6936
350	0.5665	1.056	31.01	54.73	47.21	78.9	0.6937
360	0.5576	1.059	31.33	56.19	47.81	80.99	0.6938
370	0.5489	1.061	31.65	57.67	48.4	83.09	0.694
380	0.5405	1.064	31.97	59.16	48.99	85.21	0.6943
390	0.5323	1.066	32.29	60.66	49.57	87.34	0.6945
400	0.5244	1.069	32.61	62.18	50.15	89.49	0.6948
410	0.5167	1.071	32.92	63.71	50.72	91.65	0.6951
420	0.5093	1.073	33.23	65.25	51.29	93.83	0.6954
430	0.502	1.076	33.54	66.8	51.86	96.02	0.6957
440	0.495	1.078	33.84	68.37	52.42	98.22	0.6961
450	0.4882	1.081	34.15	69.95	52.98	100.4	0.6965
460	0.4815	1.083	34.45	71.54	53.54	102.7	0.6969
470	0.475	1.085	34.75	73.15	54.09	104.9	0.6973
480	0.4687	1.088	35.04	74.77	54.64	107.2	0.6977
490	0.4626	1.09	35.34	76.4	55.18	109.4	0.6982
500	0.4566	1.093	35.63	78.04	55.72	111.7	0.6986
550	0.4289	1.104	37.07	86.44	58.37	123.3	0.7011
600	0.4043	1.115	38.46	95.12	60.93	135.2	0.7037
650	0.3824	1.125	39.81	104.1	63.41	147.4	0.7064
700	0.3628	1.135	41.11	113.3	65.81	159.8	0.7092
750	0.345	1.145	42.39	122.8	68.12	172.5	0.7121
800	0.329	1.153	43.62	132.6	70.37	185.5	0.7149
850	0.3143	1.162	44.83	142.6	72.54	198.7	0.7178
900	0.3009	1.169	46	152.9	74.65	212.2	0.7206
950	0.2886	1.177	47.15	163.4	76.7	225.8	0.7233
1000	0.2773	1.184	48.26	174.1	78.68	239.8	0.726
1100	0.2571	1.196	50.42	196.1	82.48	268.2	0.7312
1200	0.2396	1.207	52.48	219	86.09	297.6	0.736
1400	0.211	1.226	56.35	267.1	92.81	358.8	0.7444
1600	0.1885	1.241	59.92	317.9	99.08	423.6	0.7506
1800	0.1703	1.253	63.22	371.3	105.1	492.5	0.7539
2000	0.1553	1.264	66.3	426.9	111.1	566.2	0.7539

Fuente: Todas las propiedades de Keenan, Chao, Keyes, "Gas Tables", Wiley, 1985.

Excepto:

Conductividad de Y.S. Touloukian, P.E. Liley, S.C. Saxena "Thermophysical Properties of Matter – Vol 3", IFI/Plenum, NY, 1970

Viscosidad de Y.S. Touloukian, S.C. Saxena, and P. Hestermans "Thermophysical Properties of Matter – Vol 11", IFI/Plenum, NY, 1970

Tabla 4.4.2: Propiedades del Amoniaco a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
0	0.7715	2.179	93.58	12.13	21.97	13.07	0.9284
10	0.7426	2.169	97.11	13.08	23.02	14.29	0.9152
20	0.716	2.165	100.7	14.06	24.09	15.54	0.9047
30	0.6914	2.165	104.2	15.07	25.18	16.82	0.8962
40	0.6686	2.169	107.8	16.12	26.29	18.13	0.8894
50	0.6472	2.176	111.4	17.21	27.42	19.47	0.8838
60	0.6272	2.186	114.9	18.33	28.58	20.84	0.8792
70	0.6085	2.197	118.6	19.48	29.75	22.25	0.8755
80	0.5909	2.21	122.2	20.67	30.94	23.7	0.8724
90	0.5743	2.224	125.8	21.9	32.15	25.18	0.8699
100	0.5587	2.239	129.4	23.17	33.39	26.69	0.8678
120	0.5298	2.271	136.7	25.8	35.9	29.83	0.865
140	0.5039	2.307	144	28.59	38.49	33.11	0.8635
160	0.4804	2.345	151.4	31.52	41.14	36.52	0.863
180	0.459	2.385	158.8	34.6	43.86	40.07	0.8634
200	0.4395	2.426	166.2	37.82	46.64	43.75	0.8645
250	0.3972	2.533	184.8	46.53	53.83	53.5	0.8697
300	0.3624	2.645	203.5	56.15	61.34	63.99	0.8775
350	0.3333	2.759	222.2	66.68	69.1	75.15	0.8872
400	0.3085	2.875	240.9	78.1	77.09	86.94	0.8983

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Tabla 4.4.3: Propiedades del CO₂ a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
0	1.977	0.8268	137.1	6.935	14.66	8.968	0.7734
10	1.906	0.8364	142	7.452	15.43	9.683	0.7696
20	1.839	0.846	146.9	7.985	16.22	10.43	0.766
30	1.778	0.8556	151.7	8.535	17.03	11.2	0.7624
40	1.72	0.8651	156.5	9.101	17.84	11.99	0.759
50	1.666	0.8745	161.3	9.683	18.67	12.81	0.7557
60	1.616	0.8838	166.1	10.28	19.5	13.66	0.7527
70	1.568	0.8929	170.8	10.89	20.34	14.53	0.7498
80	1.523	0.9019	175.5	11.52	21.18	15.42	0.7472
90	1.481	0.9107	180.1	12.17	22.03	16.33	0.7447
100	1.441	0.9193	184.7	12.82	22.88	17.27	0.7425
120	1.367	0.9361	193.9	14.18	24.57	19.2	0.7386
140	1.3	0.9523	202.8	15.6	26.27	21.21	0.7353
160	1.24	0.9678	211.7	17.07	27.96	23.3	0.7327
180	1.185	0.9827	220.4	18.6	29.64	25.46	0.7306
200	1.135	0.9971	228.9	20.17	31.31	27.68	0.7289
250	1.026	1.031	249.7	24.34	35.44	33.52	0.7261
300	0.9361	1.061	269.6	28.8	39.47	39.74	0.7248
350	0.8609	1.089	288.8	33.54	43.41	46.31	0.7243
400	0.7968	1.114	307.2	38.55	47.26	53.23	0.7241
450	0.7417	1.137	324.9	43.8	51.02	60.49	0.7242
500	0.6937	1.159	342	49.3	54.72	68.1	0.7239

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Tabla 4.4.4: Propiedades del CO a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
0	1.25	1.041	163.9	13.11	24.59	18.9	0.6937
10	1.206	1.041	168.6	13.99	25.31	20.17	0.6933
20	1.164	1.04	173.3	14.88	26.01	21.48	0.693
30	1.126	1.04	177.9	15.8	26.71	22.81	0.6927
40	1.09	1.04	182.4	16.74	27.4	24.17	0.6924
50	1.056	1.04	186.9	17.69	28.07	25.56	0.6921
60	1.024	1.04	191.3	18.67	28.74	26.99	0.6919
70	0.9944	1.04	195.6	19.67	29.4	28.44	0.6917
80	0.9662	1.039	199.8	20.68	30.04	29.91	0.6915
90	0.9396	1.039	204	21.72	30.68	31.42	0.6913
100	0.9143	1.039	208.2	22.77	31.31	32.95	0.6911
120	0.8678	1.039	216.3	24.93	32.55	36.09	0.6907
140	0.8257	1.039	224.2	27.15	33.75	39.33	0.6904
160	0.7876	1.039	231.9	29.45	34.92	42.67	0.6901
180	0.7528	1.039	239.4	31.8	36.06	46.09	0.6899
200	0.7209	1.039	246.7	34.22	37.17	49.61	0.6897
250	0.652	1.04	264.1	40.51	39.85	58.78	0.6892
300	0.5951	1.04	280.6	47.16	42.38	68.45	0.6889
350	0.5473	1.041	296.3	54.14	44.8	78.61	0.6887
400	0.5067	1.042	311.4	61.46	47.13	89.25	0.6886
450	0.4716	1.043	326	69.11	49.4	100.4	0.6885
500	0.4411	1.045	340.2	77.12	51.63	112	0.6885

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Tabla 4.4.5: Propiedades del vapor de agua a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100.1	0.5973	2.044	122.7	20.54	25.1	20.56	0.9992
110	0.5808	2.023	126.4	21.77	25.78	21.94	0.992
120	0.5652	2.007	130.2	23.04	26.5	23.37	0.9861
130	0.5504	1.995	134	24.35	27.26	24.82	0.9812
140	0.5365	1.987	137.9	25.71	28.05	26.31	0.9771
150	0.5233	1.981	141.8	27.1	28.86	27.84	0.9735
160	0.5108	1.977	145.8	28.53	29.7	29.41	0.9703
170	0.4989	1.975	149.7	30.01	30.57	31.02	0.9675
180	0.4876	1.974	153.7	31.52	31.45	32.67	0.9649
190	0.4768	1.975	157.7	33.08	32.36	34.37	0.9624
200	0.4665	1.976	161.8	34.68	33.28	36.11	0.9602
220	0.4472	1.98	169.9	37.99	35.19	39.74	0.9559
240	0.4295	1.986	178.1	41.46	37.16	43.56	0.9519
260	0.4131	1.994	186.3	45.1	39.19	47.57	0.948
280	0.398	2.003	194.6	48.89	41.28	51.77	0.9444
300	0.384	2.013	202.9	52.84	43.41	56.16	0.9408
350	0.3529	2.04	223.7	63.38	48.96	67.98	0.9323
400	0.3266	2.07	244.5	74.87	54.75	80.98	0.9245
450	0.3039	2.102	265.2	87.26	60.76	95.13	0.9173
500	0.2842	2.135	285.7	100.5	66.97	110.4	0.9108
550	0.2669	2.168	306.1	114.7	73.35	126.8	0.9048
600	0.2516	2.203	326.2	129.7	79.89	144.2	0.8994

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Tabla 4.5: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\beta \cdot 10^3$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.1523	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.209	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.2594	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.347	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.723	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Tabla 4.6: Propiedades termofísicas del agua saturada

T (°C)	p _{sat} (kPa)	Δh _{l-g} (kJ/kg)	ρ _l (kg/m ³)	v _g (m ³ /kg)	C _{p,l} (kJ/kg·K)	C _{p,g} (kJ/kg·K)	μ _l · 10 ⁶ (N·s/m ²)	μ _g · 10 ⁶ (N·s/m ²)	k _l · 10 ³ (W/m·K)	k _g · 10 ³ (W/m·K)	Pr _l	Pr _g	β _l · 10 ³ (1/k)
0.001	0.6113	2501	1000	206.1	4.229	1.868	1793	9.216	561	17.07	13.52	1.008	-0.08063
5	0.8726	2489	1000	147	4.2	1.871	1519	9.336	570.5	17.34	11.18	1.007	0.01103
10	1.228	2477	999.7	106.3	4.188	1.874	1307	9.461	580	17.62	9.435	1.006	0.08719
15	1.706	2465	999.1	77.9	4.184	1.878	1138	9.592	589.3	17.92	8.081	1.005	0.1522
20	2.339	2453	998.2	57.78	4.183	1.882	1002	9.727	598.4	18.23	7.006	1.004	0.2089
25	3.169	2442	997	43.36	4.183	1.887	890.5	9.867	607.1	18.55	6.136	1.004	0.2593
30	4.246	2430	995.6	32.9	4.183	1.892	797.7	10.01	615.4	18.88	5.422	1.003	0.305
35	5.627	2418	994	25.22	4.183	1.898	719.6	10.16	623.3	19.23	4.83	1.002	0.3469
40	7.381	2406	992.2	19.53	4.182	1.904	653.3	10.31	630.6	19.6	4.333	1.002	0.3859
45	9.59	2394	990.2	15.26	4.182	1.912	596.3	10.46	637.3	19.97	3.913	1.001	0.4225
50	12.34	2382	988	12.04	4.182	1.919	547.1	10.62	643.5	20.36	3.555	1.001	0.4572
55	15.75	2370	985.7	9.573	4.182	1.928	504.2	10.77	649.2	20.77	3.248	1	0.4903
60	19.93	2358	983.2	7.674	4.183	1.937	466.6	10.93	654.3	21.18	2.983	0.9998	0.5222
65	25.02	2345	980.5	6.2	4.184	1.947	433.4	11.1	659	21.62	2.752	0.9995	0.5529
70	31.18	2333	977.7	5.045	4.187	1.958	404	11.26	663.1	22.07	2.551	0.9992	0.5827
75	38.56	2321	974.8	4.133	4.19	1.97	377.9	11.43	666.8	22.53	2.375	0.999	0.6118
80	47.37	2308	971.8	3.409	4.194	1.983	354.5	11.59	670	23.01	2.219	0.9989	0.6403
85	57.81	2295	968.6	2.829	4.199	1.996	333.5	11.76	672.8	23.5	2.081	0.9988	0.6682
90	70.12	2283	965.3	2.362	4.204	2.011	314.5	11.93	675.3	24.02	1.958	0.9989	0.6958
95	84.53	2270	961.9	1.983	4.21	2.027	297.4	12.1	677.4	24.55	1.849	0.999	0.723
100	101.3	2257	958.4	1.674	4.217	2.044	281.9	12.27	679.1	25.09	1.75	0.9993	0.7501
110	143.2	2230	951	1.211	4.232	2.082	254.8	12.61	681.7	26.24	1.582	1.001	0.8038
120	198.5	2202	943.2	0.8922	4.249	2.125	232.1	12.96	683.2	27.46	1.444	1.003	0.8576
130	270	2174	934.9	0.6687	4.267	2.175	213	13.3	683.7	28.76	1.329	1.006	0.9122
140	361.2	2145	926.2	0.509	4.288	2.233	196.6	13.65	683.3	30.13	1.234	1.011	0.9683
150	475.7	2114	917.1	0.3929	4.312	2.298	182.5	13.99	682.1	31.58	1.154	1.018	1.026
160	617.7	2082	907.5	0.3071	4.338	2.373	170.3	14.34	680	33.11	1.086	1.028	1.087
170	791.5	2049	897.5	0.2428	4.368	2.459	159.6	14.68	677.1	34.72	1.03	1.04	1.152
180	1002	2015	887.1	0.194	4.403	2.557	150.2	15.03	673.4	36.41	0.982	1.055	1.221
190	1254	1978	876.1	0.1565	4.443	2.669	141.8	15.37	668.8	38.18	0.9421	1.074	1.296
200	1554	1940	864.7	0.1273	4.489	2.796	134.4	15.71	663.4	40.03	0.9092	1.097	1.377
220	2318	1858	840.3	0.08616	4.604	3.107	121.6	16.41	649.8	43.99	0.8613	1.159	1.567
240	3345	1766	813.5	0.05974	4.759	3.516	110.9	17.12	632	48.31	0.8351	1.246	1.807
260	4689	1662	783.8	0.04219	4.973	4.064	101.7	17.88	609.2	53.1	0.8304	1.368	2.126
280	6413	1543	750.5	0.03016	5.278	4.828	93.56	18.7	580.3	58.53	0.8511	1.542	2.576
300	8584	1405	712.4	0.02167	5.744	5.967	85.95	19.65	543.6	64.98	0.9083	1.804	3.266
320	11279	1238	667.4	0.01548	6.542	7.87	78.46	20.84	496.7	73.25	1.033	2.24	4.47
340	14594	1028	610.8	0.01079	8.237	11.79	70.45	22.55	435.6	85.24	1.332	3.118	7.116
360	18655	721.1	528.1	0.006962	14.68	25.28	60.39	25.71	351	107.5	2.525	6.046	17.11

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

5. Transmisión de calor por conducción

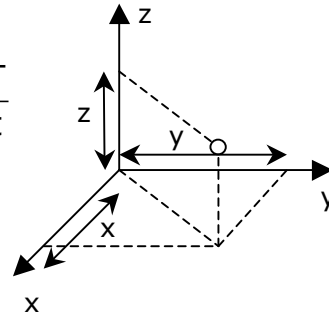
Ecuación 5.1: Ley de Fourier

$$\vec{q} = -k \vec{\nabla} T \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Cartesianas: } \vec{q} = \left[-k \frac{\partial T}{\partial x}, -k \frac{\partial T}{\partial y}, -k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ \text{Cilíndricas: } \vec{q} = \left[-k \frac{\partial T}{\partial r}, -\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta}, -k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ \text{Esféricas: } \vec{q} = \left[-k \frac{\partial T}{\partial r}, -\frac{k}{r \sin \phi} \frac{\partial T}{\partial \theta}, -\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} \right] \end{array} \right.$$

Ecuación 5.2: Ecuación general de transmisión de calor

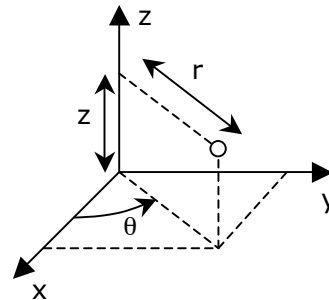
Coordenadas Cartesianas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$



Coordenadas Cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$



Coordenadas Esféricas:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

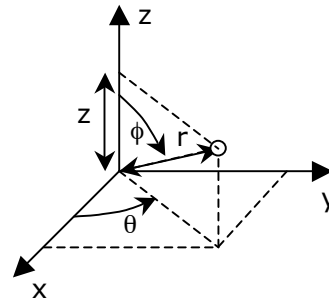


Tabla 5.3: Conducción unidimensional en régimen permanente sin generación y con k cte.

	Placa plana	Capa cilíndrica	Capa esférica
Ecuación diferencial	$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$	$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0$	$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0$
Distribución de temperaturas	$T_{s,1} - \Delta T \frac{x}{e}$	$T_{s,1} - \Delta T \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}$	$T_{s,1} - \Delta T \left[\frac{1 - (r_1/r)}{1 - (r_1/r_2)} \right]$
Flujo de calor (q'')	$k \frac{\Delta T}{e}$	$\frac{k \Delta T}{r \ln(r_2/r_1)}$	$\frac{k \Delta T}{r^2 \left[(1/r_1) - (1/r_2) \right]}$
Transferencia de calor (q)	$kA \frac{\Delta T}{e}$	$\frac{2\pi L k \Delta T}{\ln(r_2/r_1)}$	$\frac{4\pi k \Delta T}{(1/r_1) - (1/r_2)}$
Resistencia térmica ($R_{t,CD}$)	$\frac{e}{kA}$	$\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k}$	$\frac{(1/r_1) - (1/r_2)}{4\pi k}$

Nota: $\Delta T = T_{s,1} - T_{s,2}$, e: espesor de placa plana, r_1 : radio interno, r_2 : radio externo, L: longitud de la capa cilíndrica

Tabla 5.4: Distribución de temperaturas y transmisión de calor para aletas de sección transversal constante

Caso	Condición de contorno ($x=L$)	Distribución de temperaturas adimensional (θ)	Transmisión de calor total (q)
A	Convección: $\left. \frac{d\theta}{dx} \right _{x=L} = -\frac{hL}{k} \theta(L)$	$\frac{\cosh[mL(1-X)] + (h/mk) \sinh[mL(1-X)]}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$	$M \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$
B	Adiabática: $\left. \frac{d\theta}{dx} \right _{x=L} = 0$	$\frac{\cosh[mL(1-X)]}{\cosh mL}$	$Mtgh mL$
C	Aleta infinita ($L \rightarrow \infty$): $\theta(L) = 0$	e^{-mx}	M
$\theta = (T - T_\infty)/(T_0 - T_\infty); \quad X = x/L; \quad \theta(0) = 1$ $m^2 = hP/kA_c; \quad M = kA_c m(T_0 - T_\infty)$			

Nota: A_c : área transversal de la aleta, P: perímetro de la aleta

Tabla 5.5: Eficiencia de formas comunes de aletas

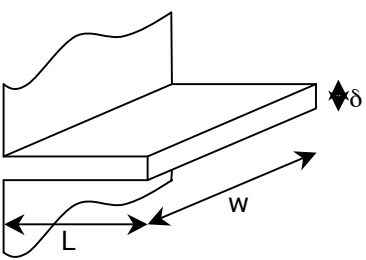
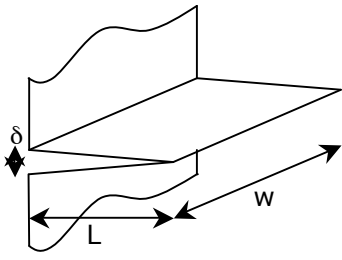
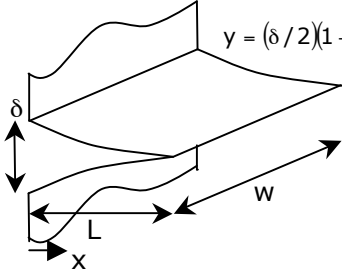
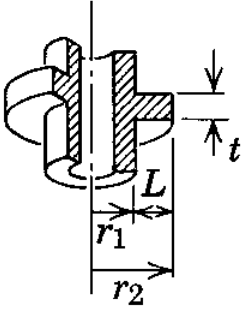
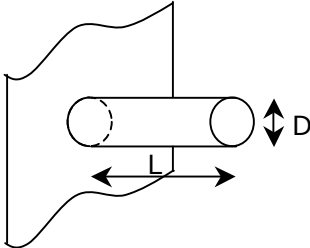
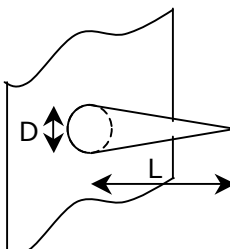
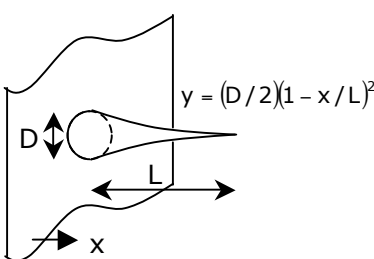
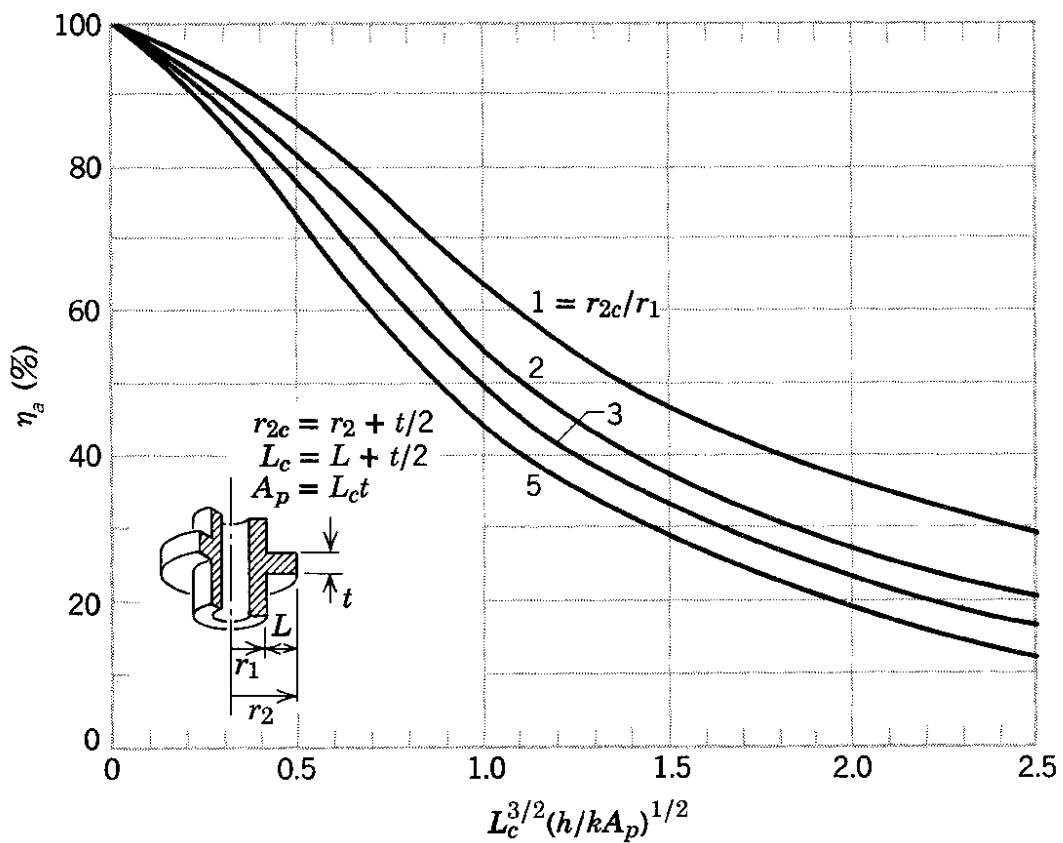
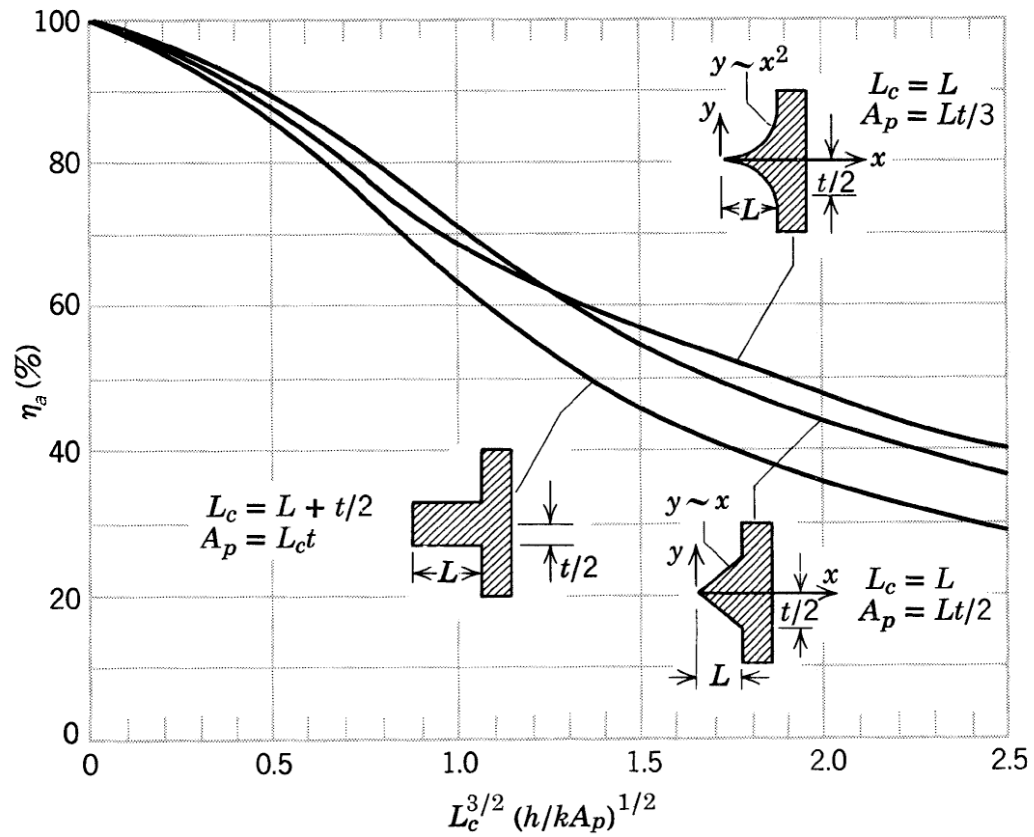
Geometría	Esquema	Expresión
Aleta recta rectangular $A_s = 2 w L_c$ $L_c = L + (\delta / 2)$ $m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta}}$		$\eta_a = \frac{\tanh(m L_c)}{m L_c}$
Aleta recta triangular $A_s = 2 w \left[L^2 + (\delta / 2)^2 \right]^{1/2}$ $m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta}}$		$\eta_a = \frac{1}{m L} \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)}$
Aleta recta parabólica $A_s = w \left[C_1 L + \left(\frac{L^2}{\delta} \right) \ln(\delta / L + C_1) \right]$ $C_1 = \left[1 + (\delta / L)^2 \right]^{1/2}$ $m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta}}$		$\eta_a = \frac{2}{\left[4(mL)^2 + 1 \right]^{1/2} + 1}$

Tabla 5.5: Eficiencia de formas comunes de aletas (cont.)

Geometría	Esquema	Expresión
Aleta circular rectangular $A_s = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)$ $r_{2c} = r_2 + (t/2)$ $m = \sqrt{\frac{2h}{kt}}$		$\eta_a = C_2 \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_1)K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_1)K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_1)I_1(mr_{2c})}$ $C_2 = \frac{(2r_1/m)}{r_{2c}^2 - r_1^2}$
Espina circular rectangular $A_s = \pi D L_c$ $L_c = L + (D/4)$ $m = \sqrt{\frac{4h}{kD}}$		$\eta_a = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}$
Espina circular triangular $A_s = \frac{\pi D}{2} [L^2 + (D/2)^2]^{1/2}$ $m = \sqrt{\frac{4h}{kD}}$		$\eta_a = \frac{2}{mL} \frac{I_2(2mL)}{I_1(2mL)}$
Espina circular Parabólica $A_s = \frac{\pi L^3}{8D} \left[\frac{C_3 C_4}{2D} \ln(2DC_4/L + C_3) \right]$ $C_3 = 1 + 2(D/L)^2$ $C_4 = [1 + (D/L)^2]^{1/2}$ $m = \sqrt{\frac{4h}{kD}}$		$\eta_a = \frac{2}{[4/9(mL)^2 + 1]^{1/2} + 1}$

Nota: I y K son las funciones de Bessel modificadas de primera y segunda clase.

Gráfica 5.6: Eficiencia de aletas rectas



6. Transmisión de calor por convección

Tabla 6.1: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, placa plana, flujo paralelo

Placa plana, flujo paralelo				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
1	$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	Laminar, local, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 50$	Tª de película	Polhausen
2	$Nu_x = 0.453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	Laminar, local, q_s cte	Tª de película	q cte
3	$Nu_x = \frac{0.3387 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}$	Laminar, local, T_s cte, $Pe_x = Re_x Pr \geq 100$	Tª de película	Churchill y Ozoe
4	$Nu_x = \frac{0.4637 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.0207}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}$	Laminar, local, q_s cte, $Pe_x = Re_x Pr \geq 100$	Tª de película	Churchill y Ozoe
5	$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	Laminar, medio, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 50$	Tª media película	Polhausen
6	$\overline{Nu}_L = 0.6795 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	Laminar, medio, q_s cte	Tª media película	q cte
7	$Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$	Turbulento, local, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 60$, $Re_x \leq 10^8$	Tª de película	Analogía de Chilton-Colburn
8	$Nu_x = 0.029 Re_x^{4/5} Pr^{0.43}$	Turbulento, local, $0.7 \leq Pr < 380$, $10^5 < Re_x \leq 5.5 \cdot 10^6$	T_∞	Whitaker
9	$\overline{Nu}_L = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$	Turbulento, medio, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 60$, $5 \cdot 10^5 < Re_x \leq 10^8$, $Re_c = 5 \cdot 10^5$	Tª media película	Analogía de Chilton-Colburn
10	$\overline{Nu}_L = (0.036 Re_L^{4/5} - 331) Pr^{0.43} (\mu / \mu_s)^{1/4}$	Turbulento, medio, $0.7 \leq Pr < 380$, $10^5 < Re_L \leq 5.5 \cdot 10^6$, $0.26 < \mu / \mu_s < 3.5$, $Re_c = 5 \cdot 10^5$	T_∞ , menos μ_s a T_s	Whitaker

- La temperatura media de película es la media aritmética de las temperaturas de película.

- Para las correlaciones (8) y (10) las propiedades se evalúan a la temperatura exterior del fluido, salvo μ_s que se evalúa a la temperatura superficial

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Tabla 6.2: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, conducto circular, flujo perpendicular

Conducto circular, flujo perpendicular				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
11	$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^{1/3}$ (Tabla 6.2.1)	Medio, $0.4 < Re_D < 4 \cdot 10^5$, $0.7 \leq Pr$	Tª media de película	Hilpert
12	$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{1/4}$ (Tabla 6.2.2)	Medio, $1 < Re_D < 10^6$, $0.7 < Pr \leq 500$, $n = 0.37(Pr \leq 10)$, $n = 0.36(Pr > 10)$	T_∞ , menos Pr_s a T_s	Zhukauskas
13	$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$	Medio, $Re_D Pr > 0.2$	Tª media de película	Churchill y Berstein

- La temperatura media de película es la media aritmética de las temperaturas de película.

- Para la correlación (12) las propiedades se evalúan a la temperatura exterior del fluido, salvo Pr_s que se evalúa a la temperatura superficial

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Tabla 6.2.1: Coeficientes correlación de Hilpert (11)
(12)

Re_D	C	m
0.4 - 4	0.989	0.330
4 - 40	0.911	0.385
40 - 4000	0.683	0.466
4000 - 40000	0.193	0.618
40000 - 400000	0.027	0.805

Tabla 6.2.2: Coeficientes correlación de Zhukauskas

Re_D	C	m
1 - 40	0.75	0.4
40 - 1000	0.51	0.5
$10^3 - 2 \cdot 10^5$	0.26	0.6
$2 \cdot 10^5 - 10^6$	0.076	0.7

Tabla 6.3: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, esfera

Esfera				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
14	$\overline{Nu}_D = 2 + (0.48 Re_D^{1/2} + 0.06 Re_D^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu/\mu_s)^{1/4}$	Medio, $3.5 < Re_D < 7.6 \cdot 10^4$, $0.71 < Pr < 300$, $1 < \mu/\mu_s < 3.2$	T_∞ , menos μ_s a T_s	Whitaker

- Para la correlación (14) las propiedades se evalúan a la temperatura exterior del fluido, salvo μ_s que se evalúa a la temperatura superficial

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Tabla 6.4: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, conducto no circular, flujo perpendicular

Conducto no circular, flujo perpendicular				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
15	$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^{1/3}$ (Tabla 6.4.1)	Medio, $0.4 < Re_D < 4 \cdot 10^5$, $0.7 \leq Pr$, Solo gases	Tª media de película	Hilpert

- La temperatura media de película es la media aritmética de las temperaturas de película.

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Tabla 6.4.1: Coeficientes de la correlación de Hilpert para conductos no circulares (15)

Geometría	Re_D	C	m
Cuadrado			
$V \rightarrow \diamond \updownarrow D$	$5 \cdot 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
$V \rightarrow \square \updownarrow D$	$5 \cdot 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
Hexágono			
$V \rightarrow \hexagon \updownarrow D$	$5 \cdot 10^3 - 1.95 \cdot 10^4$	0.160	0.638
	$1.95 \cdot 10^4 - 10^5$	0.0385	0.782
$V \rightarrow \text{hexagono plano} \updownarrow D$	$5 \cdot 10^3 - 10^5$	0.153	0.638
Placa vertical			
$V \rightarrow \text{placa} \updownarrow D$	$4 \cdot 10^3 - 1.5 \cdot 10^4$	0.228	0.731

Tabla 6.5: Correlaciones conv. forzada, flujo externo, banco de tubos, flujo perpendicular

Banco de tubos, flujo perpendicular				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
16	$\overline{Nu}_D = 1.13 C_1 C_2 Re_{D,max}^m Pr^{1/3}$ (Tabla 6.5.1 y 6.5.2)	Medio, $2 \cdot 10^3 < Re_{D,max} < 4 \cdot 10^4$, $0.7 \leq Pr$	Tª media de película	Grimison
17	$\overline{Nu}_D = C_1 C_2 Re_{D,max}^m Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{1/4}$ (Tabla 6.5.3 y 6.5.4)	Medio, $10^3 < Re_{D,max} < 2 \cdot 10^6$, $0.7 < Pr \leq 500$	Tª media del fluido, menos Pr_s a T_s media	Zhukauskas

- La temperatura media de película es la media aritmética de las temperaturas de película.
- Para la correlación (17) las propiedades se evalúan a la temperatura exterior del fluido, salvo Pr_s que se evalúa a la temperatura superficial
- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

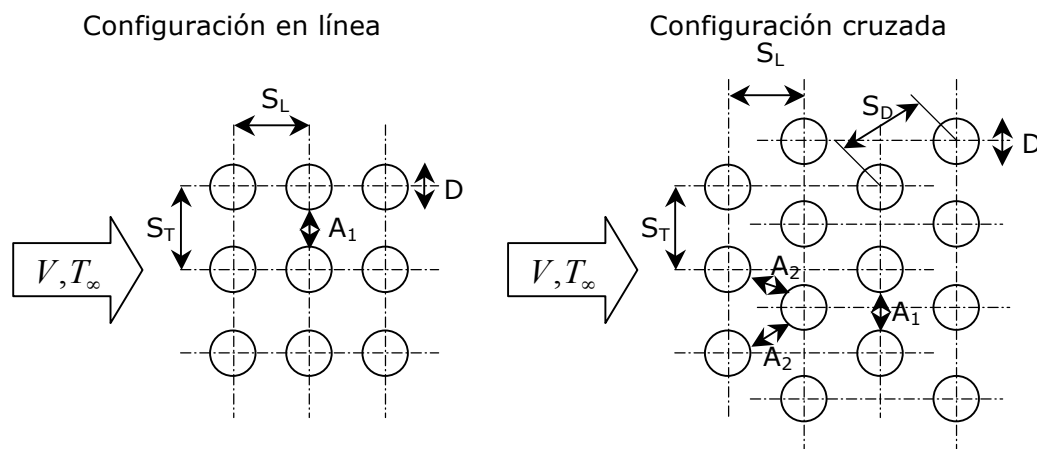


Tabla 6.5.2: Coeficiente C_2 de la correlación de Grimison (16)

N (nº filas)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
En línea	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Cruzada	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Tabla 6.5.4: Coeficiente C_2 de la correlación de Zhukauskas (17)

N (nº filas)	1	2	3	4	5	7	10	13	16
En línea	0.70	0.80	0.86	0.90	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99
Cruzada	0.64	0.76	0.84	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Tabla 6.5.1: Coeficiente C_1 y m de la correlación de Grimson (16)

Distribución	S_L/D	S_T/D							
		1.25		1.50		2.00		3.00	
		C_1	m	C_1	M	C_1	M	C_1	m
En línea	1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
	1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
	2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
	3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Cruzada	0.600	-	-	-	-	-	-	0.213	0.636
	0.900	-	-	-	-	0.446	0.571	0.401	0.581
	1.000	-	-	0.479	0.558	-	-	-	-
	1.125	-	-	-	-	0.478	0.565	0.518	0.560
	1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
	1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
	2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
	3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

Tabla 6.5.3: Coeficiente C_1 y m de la correlación de Zhukauskas (17)

Configuración	$Re_{D,max}$	C_1	m
En línea	$10-10^2$	0.8	0.4
Cruzada	$10-10^2$	0.9	0.4
En línea / Cruzada	10^2-10^3	Considerar como tubos aislados	
En línea ($S_T/S_L > 0.7$) ^(*)	$10^3-2 \cdot 10^5$	0.27	0.63
Cruzada ($S_T/S_L < 2$)	$10^3-2 \cdot 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.6
Cruzada ($S_T/S_L > 2$)	$10^3-2 \cdot 10^5$	0.4	0.6
En línea	$2 \cdot 10^5-2 \cdot 10^6$	0.021	0.84
Cruzada	$2 \cdot 10^5-2 \cdot 10^6$	0.022	0.84

^(*) Para $S_T/S_L < 0.7$, la transferencia de calor es muy poco eficaz y no debe usarse un banco de tubos en línea

Tabla 6.6: Correlaciones conv. forzada, flujo interno, conducto circular

Conducto circular				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
18	$x_{ent,t} \approx 0.0575 D Re_D Pr$	Laminar, Región de entrada térmica		
19	$f = 64/Re_D$	Laminar, complet. desarrollado		
20	$f = 0.316 Re_D^{-1/4}$	Turbulento, complet. desarrollado, sup. no rugosa, $Re_D \leq 2 \cdot 10^4$		
21	$f = 0.184 Re_D^{-1/5}$	Turbulento, complet. desarrollado, sup. no rugosa, $Re_D > 2 \cdot 10^4$		
22	$f = (0.790 \ln(Re_D) - 1.64)^{-2}$	Turbulento, complet. desarrollado, sup. no rugosa, $3000 \leq Re_D \leq 5 \cdot 10^6$		Petukhov
23	$Nu_D = 3.66$	Laminar, completamente desarrollado, T_s cte, $Pr \geq 0.6$	Tª media masa	
24	$Nu_D = 4.36$	Laminar, completamente desarrollado, q_s cte, $Pr \geq 0.6$	Tª media masa	
25	$\overline{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}}$	Laminar, entrada térmica con perfil de velocidad completamente desarrollado, T_s cte, $Pr \gg 1$ o zona inicial sin transferencia de calor	Tª media masa	Hausen
26	$\overline{Nu}_D = 1.86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	Laminar, ent. térmica e hidrodinámica, T_s cte, $0.48 \leq Pr < 16700$, $[Re_D Pr / (L/D)]^{1/3} (\mu / \mu_s)^{0.14} \geq 2$, $0.0044 < (\mu / \mu_s) < 9.75$	Tª media masa, menos μ_s a T_s	Sieder y Tate
27	$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$	Turbulento, complet. desarrollado, $Re_D > 10000$, $0.6 \leq Pr < 160$, $(L/D) > 10$, $n = 0.4$ para $T_s > T_m$, $n = 0.3$ para $T_s < T_m$	Tª media masa	Dittus-Boelter
28	$Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	Turbulento, completamente desarrollado, $Re_D > 10000$, $0.7 \leq Pr < 16700$, $(L/D) > 10$	Tª media masa, menos μ_s a T_s	Sieder y Tate
29	$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	Turbulento, completamente desarrollado, $3000 < Re_D < 5 \cdot 10^6$, $0.5 \leq Pr < 2000$, $(L/D) > 10$, f : Corr. 19 a 22 ó Ábaco de Moody (Gráfica 6.11)	Tª media masa	Gnielinski
30	$Nu_D = 4.82 + 0.0185(Re_D Pr)^{0.827}$	Turbulento, metales líq., complet. desarrollado, q_s'' uniforme, $3600 < Re_D < 9.05 \cdot 10^5$, $10^2 < Pe_D < 10^4$	Tª media masa	Skupinski
31	$Nu_D = 5.0 + 0.025 Pe_D^{0.8}$	Turbulento, metales líq., complet. desarrollado, T_s uniforme, $Pe_D > 100$	Tª media masa	Seban y Shimazaki

- La temperatura media de masa es la media aritmética de las temperaturas de masa T_m .

- Para las correlaciones (26) y (28) las propiedades se evalúan a la temperatura media de masa, salvo μ_s que se evalúa a la temperatura superficial

- Las correlaciones (27) a (31) pueden utilizarse para calcular Nu local y medio.

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Tabla 6.7: Correlaciones conv. forzada, flujo interno, conducto no circular

Conducto no circular				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
32	Nu_D (Tabla 6.7.1)	Laminar, completamente desarrollado	Tª media de masa	
33	Nu_D = ecuaciones (27) a (31) con $D = D_h = \frac{4A_c}{P}$	Turbulento, completamente desarrollado, A_c : Área de la sección transversal, P : Perímetro de la sección transversal	Tª media de masa	

- La temperatura media de masa es la media aritmética de las temperaturas de masa T_m .

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Tabla 6.7.1: Número de Nusselt y factores de fricción, flujo laminar complet. desarrollado, conductos diferente secciones (32)

Sección transversal	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		q_s'' uniforme	T_s uniforme	
	-	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
	-	3.11	2.47	53

Tabla 6.8: Correlaciones conv. libre, flujo externo, placa plana vertical, inclinada y horizontal

Placa plana vertical				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
34	$\overline{Nu}_L = C Ra_L^n$ (Tabla 6.8.1)	Medio, T _s cte	Tª media de película.	McAdams
35	$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{1 + (0.492 / Pr)^{9/16}} \right\}^2$	Medio, T _s cte, $10^{-1} < Ra_L \leq 10^{12}$	Tª media de película.	Churchill y Chu
36	$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{1 + (0.492 / Pr)^{9/16}}$	Laminar, medio, T _s cte, $10^{-1} < Ra_L \leq 10^9$	Tª media de película	Churchill y Chu

Tabla 6.8.1: Coeficiente C y n de la correlación (34)

Tipo de flujo	Ra _L	C	n
Laminar	10 ⁴ -10 ⁹	0.59	1/4
Turbulento	10 ⁹ -10 ¹³	0.10	1/3

Placa plana inclinada (θ = ángulo de la placa con la vertical)				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
37	Correlaciones (34), (35) y (36) sustituyendo Ra _L por Ra _L cos θ	0° < θ < 60°, Superficie superior de placa fría o superficie inferior de placa caliente.	Tª media de película.	
Placa plana horizontal				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
38	$\overline{Nu}_L = C Ra_L^n$ (Tabla 6.8.2)	Medio, T _s cte, Superficie superior de placa caliente o superficie inferior de placa fría, Longitud característica: L = A _s / P	Tª media de película.	McAdams
39	$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4}$	Medio, T _s cte, Superficie superior de placa fría o superficie inferior de placa caliente, Longitud característica: L = A _s / P	Tª media de película	McAdams

Tabla 6.8.2: Coeficiente C y n de la correlación de McAdams (38)

Tipo de flujo	Ra _L	C	n
Laminar	10 ⁴ -10 ⁷	0.54	1/4
Turbulento	10 ⁷ -10 ¹¹	0.15	1/3

Tabla 6.9: Correlaciones conv. libre, flujo externo, cilindro largo horizontal

Cilindro largo horizontal				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
40	$\overline{Nu}_D = C Ra_D^n$ (Tabla 6.9.1)	Medio, T_s cte	Tª media de película.	Morgan
41	$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$	Medio, T_s cte, $10^{-5} < Ra_D \leq 10^{12}$	Tª media de película.	Churchill y Chu

Tabla 6.9.1: Coeficiente C y n de la correlación de Morgan (40)

Ra_D	C	n
10^{-10} - 10^{-2}	0.675	0.058
10^{-2} - 10^2	1.020	0.148
10^2 - 10^4	0.850	0.188
10^4 - 10^7	0.480	1/4
10^7 - 10^{12}	0.125	1/3

Tabla 6.10: Correlaciones conv. libre, flujo externo, esfera

Esfera				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
42	$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0.469 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9}}$	Medio, T_s cte, $Ra_D \leq 10^{11}$, $Pr \geq 0.7$	Tª media de película.	Churchill

Tabla 6.11: Correlaciones convección libre, recinto rectangular

Recinto rectangular																
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre												
43	$\overline{Nu}_L = 0,069 Ra_L^{1/3} Pr^{0,0704}$	Medio, Ts cte, $\theta = 0^\circ$, $3 \times 10^5 < Ra_L \leq 7 \times 10^9$	T. media superficies	Globe y Dropkin												
44	$\overline{Nu}_L = 0,18 \left(\frac{Ra_L Pr}{0.2 + Pr} \right)^{0,29}$	Medio, Ts cte, $\theta = 90^\circ$, $10^3 < \frac{Ra_L Pr}{0,2 + Pr}$ $10^{-3} < Pr < 10^5$, $1 < H/L < 2$	T. media superficies	Catton												
45	$\overline{Nu}_L = 0,22 \left(\frac{Ra_L Pr}{0.2 + Pr} \right)^{0,28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-1/4}$	Medio, Ts cte, $\theta = 90^\circ$, $10^3 < Ra_L < 10^{10}$ $Pr < 10^5$, $2 < H/L < 10$	T. media superficies	Catton												
46	$\overline{Nu}_L = 0,42 Ra_L^{1/4} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.3}$	Medio, Ts cte, $\theta = 90^\circ$, $10^4 < Ra_L < 10^7$ $1 < Pr < 2 \times 10^4$, $10 < H/L < 40$	T. media superficies	MacGregor y Emery												
47	$\overline{Nu}_L = 0,046 Ra_L^{1/3}$	Medio, Ts cte, $\theta = 90^\circ$, $10^6 < Ra_L < 10^9$ $1 < Pr < 20$, $1 < H/L < 40$	T. media superficies	MacGregor y Emery												
48	$\overline{Nu}_L = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_L \cos \theta} \right]^* \left[1 - \frac{1708 (\sin 1.8 \theta)^{1,6}}{Ra_L \cos \theta} \right] + \left[\left(\frac{Ra_L \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^*$	Medio, Ts cte, $0 < \theta \leq \theta_{cr}$, $H/L \geq 12$ <table><tr><td>H/L</td><td>1</td><td>3</td><td>6</td><td>12</td><td>>12</td></tr><tr><td>θ_{cr}</td><td>25°</td><td>53°</td><td>60°</td><td>67°</td><td>70°</td></tr></table>	H/L	1	3	6	12	>12	θ_{cr}	25°	53°	60°	67°	70°	T. media superficies	Hollands
H/L	1	3	6	12	>12											
θ_{cr}	25°	53°	60°	67°	70°											
49	$\overline{Nu}_L = \overline{Nu}_L(\theta = 0^\circ) \left[\frac{\overline{Nu}_L(\theta = 90^\circ)}{\overline{Nu}_L(\theta = 0^\circ)} \right]^{\theta/\theta_{cr}} (\sin \theta_{cr})^{(\theta/4\theta_{cr})}$	Medio, Ts cte, $0 < \theta \leq \theta_{cr}$, $H/L < 12$	T. media superficies	Catton												
50	$\overline{Nu}_L = \overline{Nu}_L(\theta = 90^\circ) (\sin \theta)^{1/4}$	Medio, Ts cte, $\theta_{cr} < \theta < 90$	T. media superficies	Ayaswamy y Catton												
51	$\overline{Nu}_L = 1 + [\overline{Nu}_L(\theta = 90^\circ) - 1] \sin \theta$	Medio, Ts cte, $90 < \theta \leq 180$	T. media superficies	Arnold												

- H representa la altura y L el espesor del recinto rectangular.
- $\theta = 180^\circ$ corresponde al recinto horizontal con la superficie superior caliente y $\theta = 0^\circ$ al recinto horizontal con la superficie superior fría.
- Para $Ra_L < 1708$, $\theta = 0^\circ$ (correlación 43) y $\theta = 180^\circ$, la transferencia de calor tiene lugar por conducción ($Nu_L = 1$).
- En la correlación 48, la notación $()^*$ indica que si la cantidad incluida en el paréntesis es negativa, se ha de tomar igual a cero.

Tabla 6.12: Correlaciones convección libre, recintos cilíndricos y esféricos concéntricos

Recinto cilíndrico concéntrico				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
52	$Q = 2\pi k_{ef} L (T_i - T_e) / \ln(D_e / D_i)$ $\frac{k_{ef}}{k} = 0,386 \left[\frac{Ra^* Pr}{0,861 + Pr} \right]^{1/4}$ $Ra^* = \frac{[\ln(D_e / D_i)]^4}{\delta^3 [D_e^{-3/5} + D_i^{-3/5}]^5} Ra_\delta$	Medio, Ts cte $10^2 \leq Ra^* \leq 10^7$ $\delta = D_e - D_i$	T. media superficies	
Recinto esférico concéntrico				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
53	$Q = \pi k_{ef} D_i D_e (T_i - T_e) / \delta$ $\frac{k_{ef}}{k} = 0,74 \left[\frac{Ra^* Pr}{0,861 + Pr} \right]^{1/4}$ $Ra^* = \frac{\delta}{(D_e D_i)^4 [D_e^{-7/5} + D_i^{-7/5}]^5} Ra_\delta$	Medio, Ts cte $10^2 \leq Ra^* \leq 10^4$ $\delta = D_e - D_i$	T. media superficies	

- En la correlación (52), L representa la longitud del recinto cilíndrico..

Tabla 6.13: Correlaciones condensación

Flujo externo: Placa plana vertical y cilindro vertical si $D \gg \delta$				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
54	$h_x = \left(\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h'_{gl} k_l^3}{4 \mu_l (T_{sat} - T_s) x} \right)^{1/4}$	Laminar, Local, T_s cte, $Re \leq 1800$ $h'_{gl} = h_{gl} (1 + 0,68 Ja)$, $Re = 4M/\mu_l$	Condensado a T. media de película Vapor a T. de vapor	Nusselt
55	$\bar{h}_L = 1,76 \left(\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3}{\mu_l^2} \right)^{1/3} Re^{-1/3}$	Laminar, Medio, T_s cte, $Pr \geq 0,01$ $Re \leq 1800$,	Condensado a T. media de película Vapor a T. de vapor	Rohsenow
56	$\bar{h}_L = 0,0076 \left(\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3}{\mu_l^2} \right)^{1/3} Re^{0,4}$	Turbulento, Medio, T_s cte, $Re > 1800$	Condensado a T. media de película Vapor a T. de vapor	Kirkbride
Flujo externo: Cilindro horizontal				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
57	$\bar{h}_D = 0,725 [1 + 0,2 Ja (N - 1)] \left(\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h'_{gl} k_l^3}{\mu_l (T_{sat} - T_s) DN} \right)^{1/4}$	Laminar, Medio, T_s cte, $Re \leq 3600$, $Ja (N - 1) < 2$, $N = N^\circ$ de tubos en vertical	Condensado a T. media de película Vapor a T. de vapor	Chen
Flujo interno: Cilindro horizontal				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
58	$\bar{h}_D = 0,555 \left(\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h'_{gl} k_l^3}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right)^{1/4}$	Flujo estratificado, Medio, T_s cte, $Re_v = \frac{\rho_v u_v D}{\mu_v} < 35000$	Condensado a T. media de película Vapor a T. de vapor	Chato
59	$\bar{h}_D = C Re_D^n Pr_l^{1/3}$ $Re_D = \frac{Ge D}{\mu_l}$; $Ge = G(1 - x) + Gx \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2}$	Flujo anular, Medio, T_s cte, $C = 5,030$ $n = 1/3$ $Re_D < 5 \times 10^4$ $C = 0,0265$ $n = 0,8$ $Re_D > 5 \times 10^4$ $x =$ título del vapor	Condensado a T. media de película Vapor a T. de vapor	Akers, Deans y Crossers

- La temperatura med. de película se define como la media aritmética entre la temperatura de la superficie y la temperatura de saturación del vapor T_{sat} .
- En flujo externo, placa plana inclinada un ángulo θ con la vertical, se utilizan las correlaciones (54) a (56) con $g = g \cos \theta$
- El número de Reynolds en flujo externo se define en función del caudal másico de condensado M en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado. En flujo interno se define en función del caudal másico de condensado M_l y/o de vapor M_v
- El Re_v de la correlación (58) se evalúa a las condiciones del vapor en la sección de entrada.
- El Re_D de la correlación (59) se calcula en función del título del vapor en la sección correspondiente.
- Con vapor recalentado se sustituye T_{sat} en la temperatura media de película por la temperatura del vapor T_v y h'_{gl} se sustituye por $h'_{gl} + c_{pv} (T_v - T_{sat})$

Tabla 6.14: Correlaciones ebullición, flujo externo

Flujo externo: Ebullición en recipiente				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
60	Correlaciones Convección libre flujo externo	Convección libre, T _s cte		
61	$q_s = \mu_l h_{lg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{pl} \Delta T_e}{C_{sf} h_{lg} Pr_l^n} \right)^3$	Ebullición nucleada, T _s cte n = 1 (agua) n = 1,7 (otros líquidos) C _{sf} (Tabla 6.14.1) σ (Tabla 6.14.2)	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Rohsenow
62	$q_{max} = \frac{\pi}{24} \rho_v h_{lg} \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left(1 + \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{1/2}$	Flujo de calor crítico, T _s cte	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Zuber
63	$q_{max} = 0,131 F(L_b) \rho_v^{0,5} h_{lg} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4}$ $L_b = L \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0,5}$	Flujo de calor crítico, T _s cte F(L _b) (Tabla 6.14.3)	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Lienhard
64	$q_{min} = c_{pv} h_{lg} \left[\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4}$	Flujo de calor mínimo, Punto de Leidenfrost	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Zuber
65	$\bar{h} = \bar{h}_r + \bar{h}_c (\bar{h}_c / \bar{h})^{1/3}$ $\bar{h}_c = 0,62 \left[\frac{g \rho_v (\rho_l - \rho_v) h'_{lg} k_v^3}{\mu_v \Delta T_e D} \right]^{1/4}$ $\bar{h}_r = \frac{\sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{[(1/\varepsilon) + (1/\alpha) - 1](T_s - T_{sat})}$	Ebullición en película, medio, T _s cte h'_{lg} = h_{lg} (1 + 0,40 Ja) Ja = c _{pv} ΔT _e / h _{lg} ε = emisividad superficie, α = absortividad líquido	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Bromley

- La temp. med. de película se define como la media aritmética entre la temperatura de la superficie y la temperatura de saturación del líquido T_{sat}.

Tabla 6.15: Correlaciones ebullición, flujo interno

Flujo interno: Ebullición en convección forzada				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
66	Correlaciones convección forzada flujo interno	Convección forzada, Local, medio, Ts cte		
67	correlación (61) (Tabla 6.14.2 y 6.15.1)	Ebullición subenfriada, Ts cte	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Rohsenow
68	$h_{FB} = h_c + h_{EN}$ $h_c = 0,023(k_l / D)Re_l^{0,8} Pr_l^{0,4} F$ $\frac{1}{X_{tt}} < 0,1 \quad F = 1,0$ $\frac{1}{X_{tt}} > 0,1 \quad F = 2,35 \left(\frac{1}{X_{tt}} + 0,213 \right)^{0,736}$ $h_{EN} = 0,00122 \phi \Delta P_{sat}^{0,75} \Delta T_e^{0,24} S$ $\phi = \frac{k_l^{0,79} c_{pl}^{0,45} \rho_l^{0,49}}{\sigma^{0,5} \mu_l^{0,29} h_{lg}^{0,24} \rho_v^{0,24}}$ $Re_{FB} < 32,5 \quad S = (1 + 0,12 Re_{FB}^{1,14})^{-1}$ $32,5 < Re_{FB} < 70 \quad S = (1 + 0,42 Re_{FB}^{0,78})^{-1}$ $Re_{FB} > 70 \quad S = 0,1$	Flujo bifásico, Ts cte $Re_l = G(1 - x)D / \mu_l$ $\Delta P_{sat} = P_{sat}(T_s) - P_{sat}(T_{sat})$ $X_{tt} = \left(\frac{1 - x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0,1}$ $Re_{FB} = \frac{G(1 - x)D}{\mu_l} F^{1,25} \cdot 10^{-4}$	Vapor a T. med. de película Líquido a T. de saturación	Chen

- La temp. media de película se define como la media aritmética entre la temperatura de la superficie y la temperatura de saturación del líquido T_{sat} .
- En la correlación (68), G representa el caudal másico por tubo y por unidad de superficie y x el título del vapor en la sección.

Tabla 6.14.1: Coeficiente C_{sf} correlación (61)

Combinación líquido-superficie	C_{sf}
Agua – cobre	0,0130
Agua – cobre rayado	0,0068
Agua – cobre esmerilado y pulido	0,0128
Agua – cobre esmerilado y pulido, tratado con parafina	0,0147
Agua – acero inoxidable	0,0133
Agua – acero inoxidable pulido mecánicamente	0,0132
Agua – acero inoxidable esmerilado y pulido	0,0080
Agua – acero inoxidable picado, relleno con teflón	0,0058
Agua – platino	0,0130
Agua – latón	0,0060
Benceno – cromo	0,0100
Alcohol etílico – cromo	0,0027
Tetracloruro de carbono – cobre	0,0130
Tetracloruro de carbono – cobre esmerilado y pulido	0,0070
n-Pentano – cobre esmerilado y pulido	0,0154
n-Pentano – níquel esmerilado y pulido	0,0127
n-Pentano – cobre esmerilado y pulido	0,0074
n-Pentano – cobre laminado	0,0049

Tabla 6.14.2: Tensión superficial en interfase líquido-vapor

Fluido	Temperatura Saturación (°C)	Tensión superficial $\sigma \times 10^3$ (N/m)
Agua	0	75,5
Agua	20	72,9
Agua	40	69,5
Agua	60	66,1
Agua	80	62,7
Agua	100	58,9
Agua	150	48,7
Agua	200	37,8
Agua	250	26,1
Agua	300	14,3
Agua	350	3,6
Sodio	880	11,2
Potasio	760	62,7
Cesio	680	29,2
Mercurio	355	39,4
Benceno	80	27,7
Alcohol etílico	78	21,9
Freón 11	45	8,5

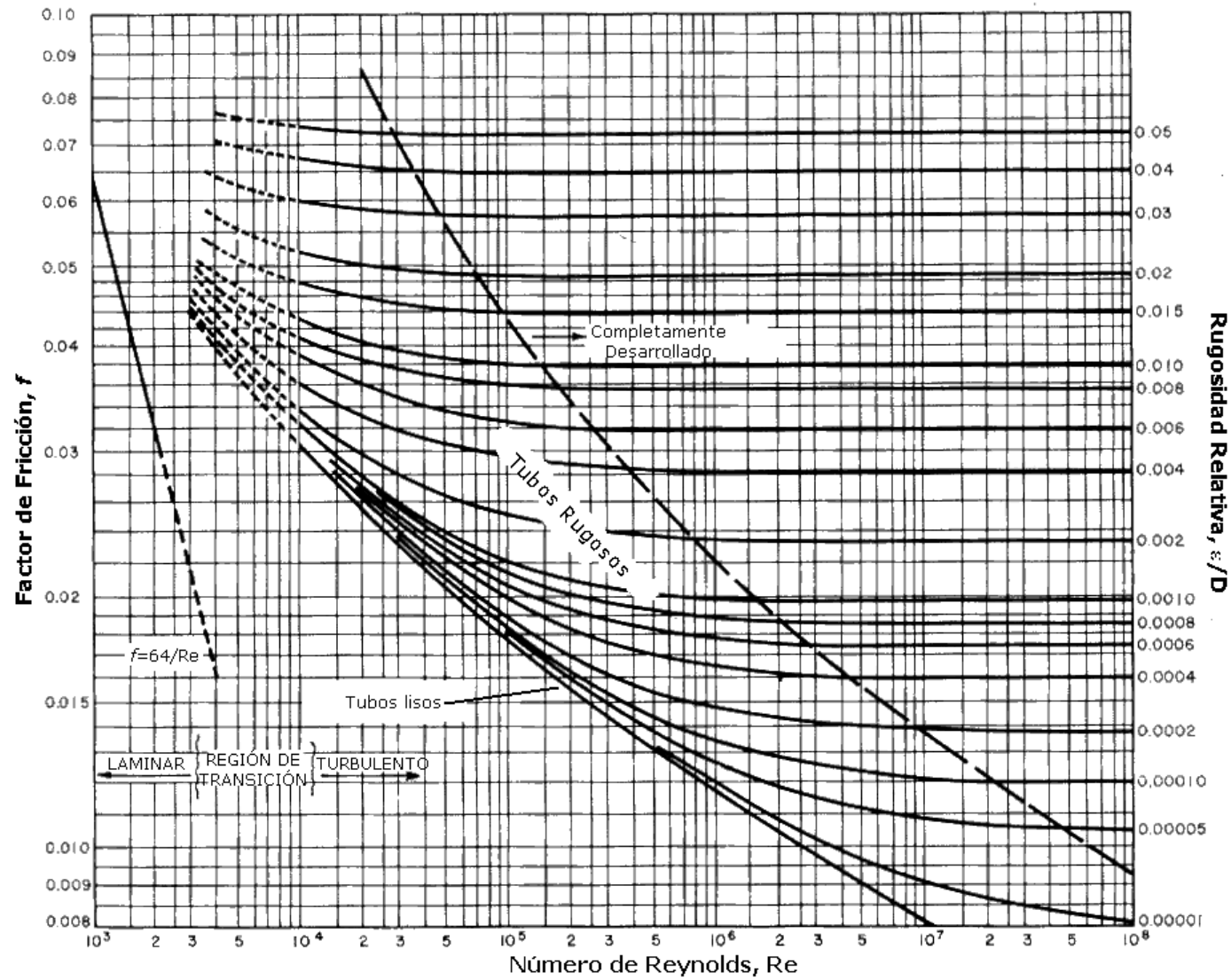
Tabla 6.14.3: Factor de corrección, correlación (63)

Geometría	$F(L_b)$	Condiciones aplicación
Placa plana infinita	1,14	$L_b > 30$
Cilindro horizontal	$0,89 + 2,27 \exp(-3,44 \sqrt{L_b})$	$L_b > 0,15$; $L = \text{radio}$
Esfera	0,84	$L_b > 4,26$; $L = \text{radio}$
	$1,734 (L_b)^{-1/2}$	$0,15 < L_b < 4,26$; $L = \text{radio}$
Cuerpo infinito	$\approx 0,90$	$L_b > 4$; $L = \text{Vol/Sup}$

Tabla 6.15.1: Coeficiente C_{sf} correlación (67)

Geometría: Tubería	Combinación líquido-superficie	C_{sf}
Horizontal – 15mm ID	Agua – acero inoxidable	0,015
Horizontal – 2,4mm ID	Agua – acero inoxidable	0,020
Vertical – 4,5mm ID	Agua – níquel	0,006
Vertical – 27mm ID	Agua – cobre	0,013
	Tetracloruro carbono – cobre	0,013

Gráfica 6.16: Ábaco de Moody



7. Transmisión de calor por radiación

Ecuaciones 7.1: Intercambio radiante en recintos

Radiosidad:

Ecuación (1a): $J_i = \varepsilon_i M_i^0 + (1 - \varepsilon_i) E_i$

Ecuación (1b): $J_i = \varepsilon_i M_i^0 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j$

Irradiación:

Ecuación (2): $E_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j$

Flujo de calor:

Ecuación (3a): $q_i = A_i (\varepsilon_i M_i^0 - \alpha_i E_i) = A_i \left(\varepsilon_i M_i^0 - \varepsilon_i \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \right)$

Ecuación (3b): $q_i = A_i (J_i - E_i)$

Ecuación (3c): $q_i = \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (M_i^0 - J_i) = \frac{(M_i^0 - J_i)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i} \right)}$

Ecuación (3d): $q_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i - J_j) = \sum_{j=1}^N \frac{(J_i - J_j)}{\left(\frac{1}{A_i F_{ij}} \right)}$

Esquema 7.2: Analogía eléctrica para radiación

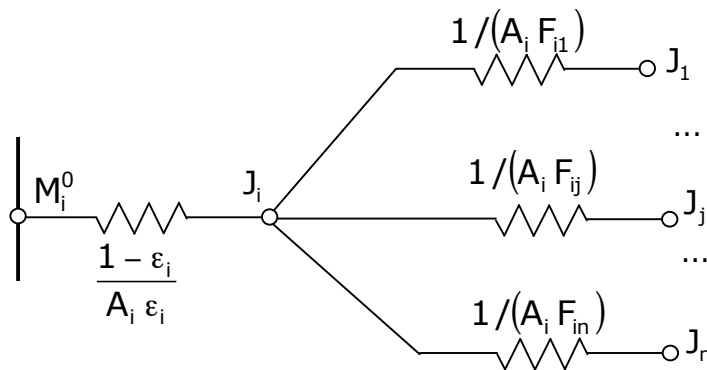
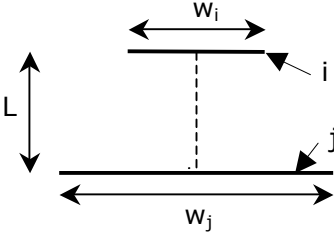
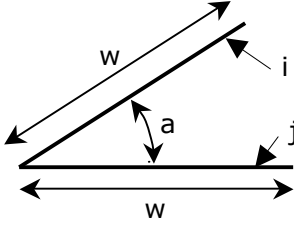
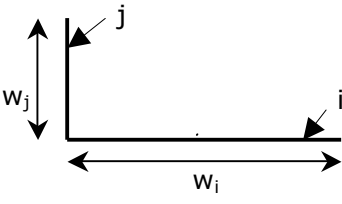
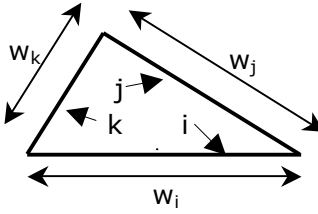
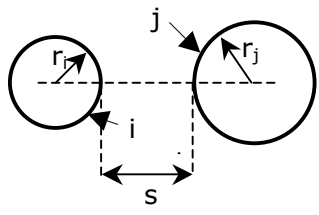
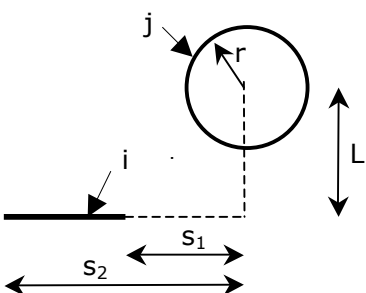
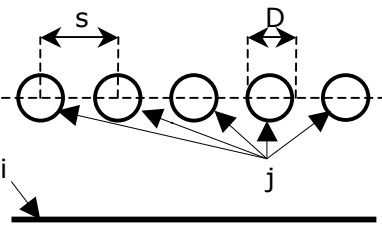


Tabla 7.3: Funciones de radiación del cuerpo negro

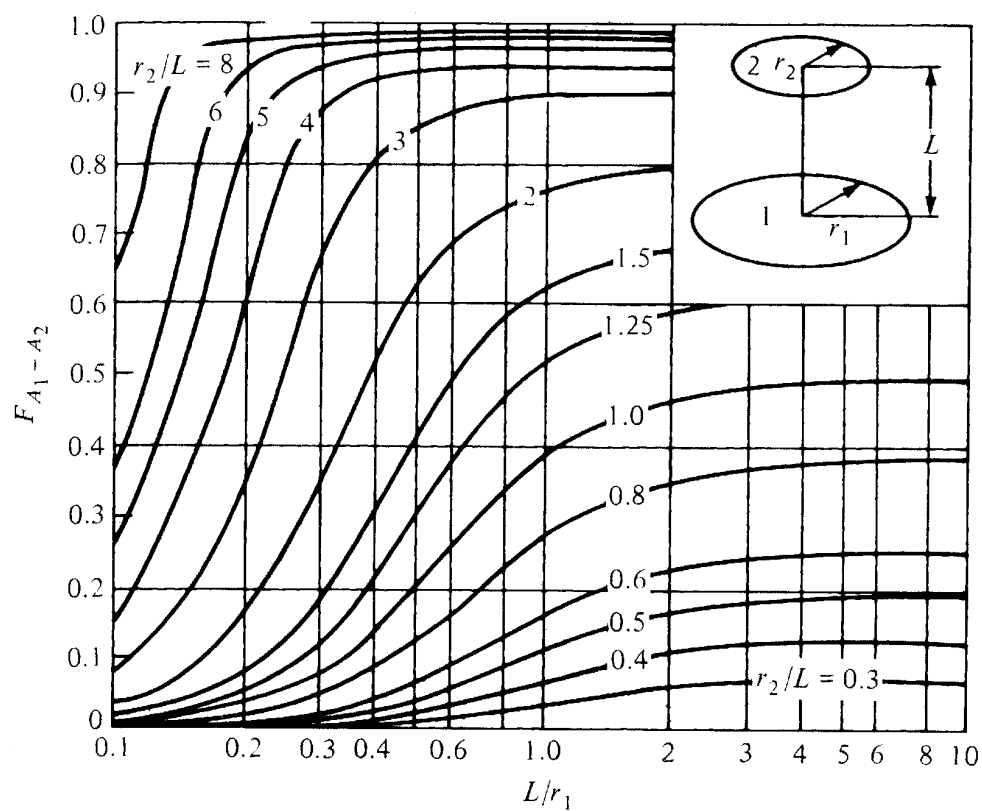
λT ($\mu\text{m}\cdot\text{K}$)	$M^0(\lambda, T)/$ $M^0(\lambda_{\text{máx}}, T)$	$F_{0-\lambda}$	λT ($\mu\text{m}\cdot\text{K}$)	$M^0(\lambda, T)/$ $M^0(\lambda_{\text{máx}}, T)$	$F_{0-\lambda}$
200	0.000000	0.000000	7200	0.235648	0.819217
400	0.000000	0.000000	7400	0.218786	0.829527
600	0.000014	0.000000	7600	0.203308	0.839102
800	0.001372	0.000016	7800	0.189094	0.848005
1000	0.016402	0.000321	8000	0.176033	0.856288
1200	0.072516	0.002134	8500	0.147781	0.874608
1400	0.186035	0.007790	9000	0.124769	0.890029
1600	0.344815	0.019718	9500	0.105929	0.903085
1800	0.519815	0.039341	10000	0.090419	0.914199
2000	0.682947	0.066728	10500	0.077580	0.923710
2200	0.816119	0.100888	11000	0.066895	0.931890
2400	0.911920	0.140256	11500	0.057955	0.939959
2600	0.970641	0.183120	12000	0.050435	0.945098
2800	0.996866	0.227897	13000	0.038679	0.955139
2897.8	1.000000	0.250108	14000	0.030123	0.962898
3000	0.996887	0.273232	15000	0.023788	0.969981
3200	0.977122	0.318102	16000	0.019021	0.973814
3400	0.943308	0.361735	18000	0.012571	0.980860
3600	0.900197	0.403607	20000	0.008627	0.985602
3800	0.851518	0.443382	25000	0.003827	0.992215
4000	0.800085	0.480877	30000	0.001944	0.995340
4200	0.747947	0.516014	40000	0.000656	0.997967
4400	0.696541	0.548796	50000	0.000279	0.998953
4600	0.646838	0.579280	75000	0.000058	0.999713
4800	0.599456	0.607559	100000	0.000019	0.999905
5000	0.554755	0.633747			
5200	0.512911	0.658970			
5400	0.473970	0.680360			
5600	0.437889	0.701046			
5800	0.404567	0.720158			
6000	0.373869	0.737818			
6200	0.345635	0.754140			
6400	0.319701	0.769234			
6600	0.295897	0.783199			
6800	0.274058	0.796129			
7000	0.254025	0.808109			

Tabla 7.4: Factores de forma para geometrías bidimensionales

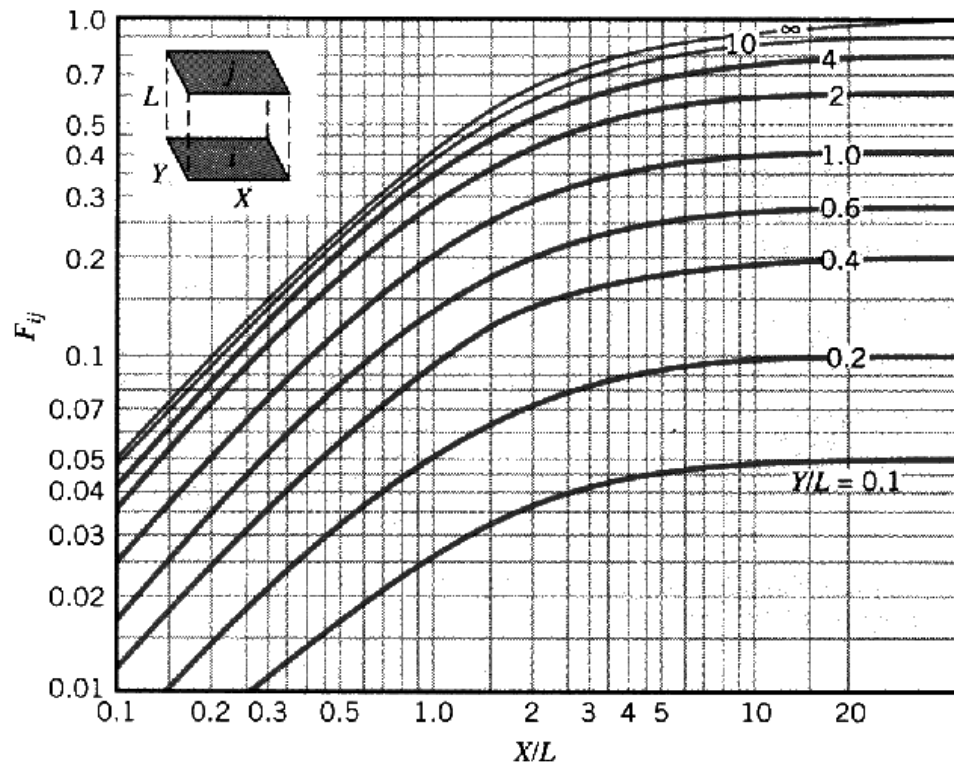
Geometría	Esquema	Expresión
Placas paralelas con las líneas medias en la misma perpendicular. $W_i = w_i / L$ $W_j = w_j / L$		$F_{ij} = \frac{\left[(W_i + W_j)^2 + 4 \right]^{1/2} - \left[(W_j - W_i)^2 + 4 \right]^{1/2}}{2W_i}$
Placas inclinadas de igual ancho y un lado común.		$F_{ij} = 1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$
Placas perpendiculares con un lado común.		$F_{ij} = \frac{1 + (w_j / w_i) - \left[1 + (w_j / w_i)^2 \right]^{1/2}}{2}$
Recinto de tres lados.		$F_{ij} = \frac{w_i + w_j - w_k}{2w_i}$
Cilindros paralelos de radios diferentes. $R = r_j / r_i$ $S = s / r_i$ $C = 1 + R + S$		$F_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \pi + \left[C^2 - (R + 1)^2 \right]^{1/2} - \left[C^2 - (R - 1)^2 \right]^{1/2} \right. \\ + (R - 1) \cos^{-1} \left[\left(\frac{R}{C} \right) - \left(\frac{1}{C} \right) \right] \\ \left. - (R + 1) \cos^{-1} \left[\left(\frac{R}{C} \right) + \left(\frac{1}{C} \right) \right] \right\}$

Geometría	Esquema	Expresión
Cilindro y placa paralelos.		$F_{ij} = \frac{r}{s_1 - s_2} \left[\tan^{-1} \frac{s_1}{L} - \tan^{-1} \frac{s_2}{L} \right]$
Placa infinita y fila de cilindros.		$F_{ij} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \left(\frac{D}{s} \right) \tan^{-1} \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2}$

Gráfica 7.5: Factores de forma para discos coaxiales paralelos



Gráfica 7.6: Factores de forma para rectángulos paralelos alineados



Gráfica 7.7: Factores de forma para rectángulos perpendiculares con un lado común

