



Formulario

Examen General para el Egreso
de la Licenciatura en Ingeniería Química

EGEL Plus IQUIM

Formulario
Examen General para el Egreso
de la Licenciatura en Ingeniería Química
EGEL Plus IQUIM

Directorio**Antonio Ávila Díaz**

Director General

Alejandra Zúñiga Bohigas

Directora de los Exámenes

Generales para el Egreso de la Licenciatura

Wilson Jesús Pool CibriánSubdirector de Evaluación de Egreso
en Diseño, Ingenierías y Arquitectura**Luis Abraham Maya Olivares**Responsable del EGEL Plus Sección
Disciplinaria en Ingeniería Química*Formulario*

D.R. © 2021

Centro Nacional de Evaluación
para la Educación Superior, A.C. (Ceneval)

Primera edición

Contenido

| | |
|---|----------|
| Análisis elemental y fenomenológico de procesos | 8 |
| Energía cinética (Ek) y energía potencial (Ep) | 8 |
| Energía inicial (Ei) y energía final (Ef) del sistema | 8 |
| Primera ley para sistemas termodinámicos | 8 |
| Segunda Ley de la Termodinámica | 9 |
| Coeficientes termodinámicos | 10 |
| Eficiencia térmica..... | 10 |
| Ciclos Termodinámicos..... | 10 |
| Ciclos de potencia | 10 |
| Ecuación de Clapeyron | 11 |
| Ecuación de Clausius-Clapeyron | 11 |
| Ecuaciones de Clausius-Clapeyron integradas | 11 |
| Ecuación de Antoine..... | 11 |
| Ley de los gases ideales | 12 |
| Ecuación de estado..... | 12 |
| Para presiones parciales | 12 |
| Relaciones termodinámicas para gases ideales..... | 13 |
| Factor acéntrico de Pitzer | 14 |
| Factor de compresibilidad | 14 |
| Correlaciones de M.M. Abbott..... | 14 |
| Potenciales termodinámicos | 14 |
| Energía Interna..... | 14 |
| Entalpía | 14 |
| Energía libre de Helmholtz | 14 |
| Energía libre de Gibbs (entalpía libre)..... | 14 |
| Energía libre de Gibbs en una reacción..... | 15 |
| Entalpía total de una reacción | 15 |
| Relación entre la termodinámica y el equilibrio químico | 15 |
| Variación de la energía libre de Gibbs | 15 |
| Fugacidad | 16 |
| Ley Raoult | 16 |
| Presión de rocío | 16 |
| Presión de burbuja..... | 17 |
| Trabajo (sistema sin flujo) del sistema | 17 |
| Trabajo (sistema fluyendo) del sistema | 17 |
| Calor del sistema | 18 |
| La ecuación fundamental de la Termodinámica | 18 |
| Relaciones de Maxwell | 18 |
| Reglas de las fases de Gibbs..... | 18 |
| Ecuaciones de estado | 18 |
| Virial | 18 |
| Van der Waals..... | 19 |

| | |
|---|-----------|
| Redlich-Kwong | 19 |
| Soave-Redlich-Kwong..... | 19 |
| Peng-Robinson..... | 19 |
| Constante de Equilibrio..... | 19 |
| Cálculos del Equilibrio Líquido Vapor | 20 |
| Sistema binario no ideal | 21 |
| Volatilidad relativa del componente 1 con respecto al 2 | 21 |
| Balance de energía para una reacción..... | 21 |
| Ley de Fick de la difusión binaria..... | 22 |
| Coordenadas rectangulares | 22 |
| Coordenadas cilíndricas..... | 22 |
| Coordenadas esféricas | 22 |
| Ecuación de Nernst..... | 22 |
| Modelos de transferencia de momentum | 22 |
| Ecuación de Bernoulli | 22 |
| La ecuación de continuidad en distintos sistemas coordenados..... | 23 |
| Coordenadas rectangulares (x, y, z) | 23 |
| Coordenadas cilíndricas (r, θ , z) | 23 |
| Ecuaciones de movimiento en distintos sistemas coordinados..... | 23 |
| Coordenadas rectangulares (x, y, z) | 23 |
| Coordenadas cilíndricas (r, θ , z) | 24 |
| Ley de Newton para determinar viscosidad | 24 |
| Difusión en estado estacionario de A a través del no difundente B..... | 25 |
| Contradifusión equimolar en estado estacionario | 25 |
| Fórmula de pérdida de calor al entorno..... | 25 |
| Análisis de grados de libertad en un proceso | 25 |
| Número de Sherwood | 25 |
| Resistencias térmicas | 26 |
| Balance de energía de un sistema abierto en estado transitorio | 26 |
| Análisis y diseño de procesos de transformación básica..... | 27 |
| Ley de viscosidad-Newton | 27 |
| Casos representativos en coordenadas rectangulares | 27 |
| Casos representativos en coordenadas cilíndricas | 27 |
| Flujo entre dos secciones de un conducto | 27 |
| La ecuación de energía térmica en distintos sistemas coordinados | 27 |
| En función de q, densidad constante | 27 |
| Coordenadas rectangulares (x, y, z) | 27 |
| Coordenadas cilíndricas (r, θ , z) | 27 |
| Coordenadas esféricas (r, θ , ϕ) | 28 |
| En función de T, densidad y conductividad constantes | 28 |
| Coordenadas rectangulares (x, y, z) | 28 |
| Coordenadas cilíndricas (r, θ , z) | 28 |
| Coordenadas esféricas (r, θ , ϕ) | 28 |
| Ley de conducción de calor de Fourier | 28 |
| Coordenadas rectangulares | 28 |
| Coordenadas cilíndricas | 28 |
| Coordenadas esféricas | 29 |

| | |
|--|----|
| Ley de Stefan-Boltzmann | 29 |
| Ecuación de la ley de velocidad de una reacción..... | 29 |
| Selectividad | 29 |
| Ecuación de Arrhenius | 30 |
| Constante de equilibrio | 30 |
| Constante de equilibrio químico en función de la temperatura Ecuación de Van't Hoff..... | 31 |
| Calor intercambiado | 32 |
| Calor con cambio de fase..... | 32 |
| Ecuación básica de transferencia de calor | 32 |
| Transferencia de calor por convección | 32 |
| Coeficiente Convectivo de transferencia de calor, h..... | 32 |
| Coeficiente Global de transferencia de calor, U_0 | 33 |
| Factor de ensuciamiento | 33 |
| Número de tubos..... | 33 |
| Media logarítmica de diferencias de temperatura..... | 33 |
| Corrección de LMTD eficiencias térmicas R y S | 33 |
| Intercambiadores de placa..... | 34 |
| Área por placa | 34 |
| Número de placas | 34 |
| Economía del proceso de evaporación | 34 |
| Torres de enfriamiento | 34 |
| Altura de torre de enfriamiento..... | 34 |
| Unidades de transferencia | 34 |
| Humidificación | 34 |
| Entalpía para mezclas aire – vapor..... | 34 |
| Ósmosis inversa | 34 |
| Ley de Kohlrausch..... | 34 |
| Ecuación de Onsager..... | 35 |
| Concentración | 35 |
| Destilación | 35 |
| Composición del azeótropo..... | 35 |
| Líneas de operación columna (McCabe-Thiele) | 36 |
| Línea de alimentación (McCabe-Thiele) | 36 |
| Ecuación de Rayleigh para sistemas binarios de volatilidad constante | 36 |
| Método de Ponchon Savarit..... | 37 |
| Ecuaciones para métodos cortos | 37 |
| Ecuación de Fenske | 37 |
| Distribución de componentes no claves | 37 |
| Ecuación de Underwood, primera | 37 |
| Ecuación de Underwood, segunda, (reflujo mínimo) | 38 |
| Correlación de Gilliland | 38 |
| Número de ecuaciones necesarias para la separación continua de los componentes mediante métodos rigurosos (MESH)..... | 39 |
| Altura de la cama empacada en función de unidades de transferencia..... | 39 |
| Altura de la cama empacada en función de unidades de transferencia (soluciones diluidas) | 39 |

| | |
|--|-----------|
| Alturas de torres empacadas | 40 |
| Anillos Rasching | 40 |
| Sillas Berl..... | 40 |
| Constantes de empaques..... | 40 |
| Balances molares para reactor intermitente (o por lotes) | 41 |
| Balances molares para reactor tipo tanque agitado..... | 41 |
| Balances molares para reactor tubular con flujo pistón..... | 41 |
| Balances de energía para reactores adiabáticos | 42 |
| Reactor por lotes o intermitente | 42 |
| Reactor de tanque agitado | 42 |
| o tubular con flujo pistón | 42 |
| Selectividad para sistemas de reactores con reacciones múltiples en paralelo..... | 42 |
| Reactores de flujo no ideal | 43 |
| Funciones de distribución..... | 43 |
| de tiempo de residencia | 43 |
| Alimentación de trazador tipo pulso | 43 |
| Funciones de distribución..... | 43 |
| de tiempo de residencia | 43 |
| Alimentación de trazador tipo escalón | 43 |
| Tiempo de residencia medio | 43 |
| Tiempo adimensional | 43 |
| Ecuación de Ergun..... | 43 |
| Cálculo de la concentración del reactivo que se encuentra dentro del sistema en un reactor intermitente..... | 43 |
| Modelo Kunii-Levenspiel para dimensionamiento de reactores de lecho fluidizado con reacción de primer orden | 44 |
| Bomba NPSH | 46 |
| Correlación generalizada para inundación y caída de presión en columnas de relleno. (Según Eckert)..... | 47 |
| Algunas Técnicas de Separación Basadas en el Equilibrio (parte I) | 48 |
| Algunas Técnicas de Separación Basadas en el Equilibrio (parte II) | 48 |
| Diseño, optimización y control de procesos | 49 |
| Heurística para síntesis de secuencia de separación | 49 |
| Costo base para hornos de proceso | 49 |
| Costo base para calentadores de fuego directo | 50 |
| Costo base de intercambiadores de calor | 51 |
| Costo de intercambiadores de calor (áreas pequeñas) | 52 |
| Costo de enfriadores de aire..... | 53 |
| Costo base de recipientes de proceso | 54 |
| Costo de platos para columnas de destilación..... | 56 |
| Costo base de bombas centrífugas | 57 |
| Costo base de compresores de gases..... | 58 |
| Automatización de procesos | 59 |
| Sistemas de primer orden | 59 |
| Sistemas de segundo orden..... | 59 |
| Funciones de transferencia de los controladores P, PI, PID | 59 |
| Método de la Sección Dorada para optimización univariable | 60 |

| | |
|--|------------|
| Método de Fibonacci para optimización univariable | 60 |
| Gráficas y tablas | 61 |
| <i>Diagrama psicrométrico</i> | 61 |
| <i>Diagrama de Mollier</i> | 62 |
| <i>Gráfica de Eckert para torres empacadas</i> | 63 |
| <i>Gráficas-Factores de Corrección para cambiadores de calor</i> | 65 |
| <i>Diagrama de Moody</i> | 69 |
| <i>Constantes de la ecuación de Antoine</i> | 70 |
| <i>Constantes de propiedades físicas</i> | 73 |
| <i>Tablas de propiedades termodinámicas de algunos gases inorgánicos</i> | 74 |
| Nitrógeno diatómico (N_2) | 74 |
| Oxígeno diatómico (O_2) | 75 |
| Monóxido de carbono (CO) | 76 |
| Dióxido de carbono (CO_2) | 77 |
| Agua (H_2O) | 78 |
| Hidrógeno diatómico (H_2) | 79 |
| <i>Conductividades molares límite de los iones a 25 °C; $\lambda_\infty /10^{-4}$ S m²/mol</i> | 80 |
| <i>Número de tubos en configuraciones comerciales de carcasa y tubos, 1 paso por carcasa, n pasos de tubos</i> | 81 |
| <i>Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas</i> | 85 |
| <i>Tablas de vapor sobrecalentado</i> | 86 |
| <i>Factores K para accesorios</i> | 91 |
| <i>Factores K para codos bridados de 90°</i> | 91 |
| <i>Rugosidades absolutas para varios materiales</i> | 92 |
| <i>Especificaciones para tubos de acero comercial según norma ANSI</i> | 93 |
| <i>Grupos adimensionales</i> | 94 |
| <i>Teorema de Buckingham o teorema Π (P_i)</i> | 95 |
| <i>Transformada de Laplace</i> | 96 |
| <i>Factores de dimensionamiento de válvulas para flujo máximo de acuerdo al modelo de Masoneilan</i> | 97 |
| <i>Factores de dimensionamiento de válvulas en función de la apertura de acuerdo al modelo de Masoneilan</i> | 98 |
| <i>Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz</i> | 98 |
| <i>Tabla de conversiones</i> | 99 |
| <i>Constantes físicas</i> | 101 |
| Consejo Técnico | 102 |



Análisis elemental y fenomenológico de procesos

Energía cinética (Ek) y energía potencial (Ep)

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_p = mgh$$

m = masa del sistema

v = velocidad del sistema

g = aceleración de gravedad

h = distancia al plano de referencia, medida a partir del centro de masa del sistema

Energía inicial (Ei) y energía final (Ef) del sistema

$$E_i = U_i + E_{ki} + E_{pi}$$

U = energía interna

Ec = energía cinética

$$E_f = U_f + E_{kf} + E_{pf}$$

Ep = energía potencial

Primera ley para sistemas termodinámicos

$$\Delta U = Q + W$$

ΔU = incremento de energía interna del gas

($\Delta U = U_{\text{final}} - U_{\text{initial}}$)

Q = calor intercambiado por el sistema con el entorno

W = trabajo intercambiado por el sistema con el entorno



Segunda Ley de la Termodinámica

Definición general de Entropía (S)

$$\Delta S_{sistema} = \int_i^f \frac{dQ_{reversible}}{T}$$

$$\Delta S_{entorno} = \int_i^f \frac{dQ_{entorno}}{T_{entorno}}$$

$$\Delta S_{Universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{entorno}$$

ΔS = cambio de entropía de un punto inicial (*i*)

a uno final (*f*)

dQ = diferencial del calor intercambiado

T = temperatura

Proceso reversible

$$\Delta S_{Universo} = 0$$

ΔS = cambio de entropía

n = moles del sistema

R = constante Universal de los gases

V_f = volumen final del sistema

V_i = volumen inicial del sistema

$$\Delta S_{Universo} > 0$$

Entropía de un proceso de expansión isotérmico (tanto reversible como irreversible)

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i}$$

Variación de la entropía con la temperatura

$$S(T_f) = S(T_i) + \int_i^f \frac{dQ_{reversible}}{T}$$

A presión constante

$$dQ_{reversible} = C_p dT$$

C_p = capacidad calorífica a presión constante

C_v = capacidad calorífica a volumen constante

S(*T_i*) = entropía cuando el sistema está a una temperatura inicial

S(*T_f*) = entropía cuando el sistema está a una temperatura final

dQ = diferencial del calor intercambiado

T = temperatura

A volumen constante

$$dQ_{reversible} = C_v dT$$

$$S(T_f) = S(T_i) + \int_i^f \frac{C_v dT}{T}$$



Coeficientes termodinámicos

Capacidad calorífica

Isobárica

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$$

S = entropía cuando el sistema está a una temperatura inicial

Q = calor

H = entalpía

T = temperatura

Isocórica

$$C_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_v$$

Calidad del vapor

$$X = \frac{m_v}{m}$$

$$\hat{x}_i = \hat{x}_L + X(\hat{x}_V - \hat{x}_L)$$

X = calidad del vapor

m_v = masa de la fase vapor

m = masa total del sistema

\hat{y}_v = fracción mol de líquido saturado

\hat{x}_L = fracción mol de vapor saturado

\hat{x}_i = fracción mol en equilibrio líquido-vapor

$$X = \frac{\hat{x}_i - \hat{x}_L}{\hat{y}_v - \hat{x}_L}$$

Eficiencia térmica

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

η = rendimiento o eficiencia térmica

W = trabajo realizado por la máquina

Q₁, Q₂ = calor. Representa el flujo de calor transferido entre la fuente - máquina y máquina - entorno respectivamente

Ciclos Termodinámicos

Ciclos de potencia

| Ciclo | Propiedad constante | | | |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|
| | 1 → 2 | 2 → 3 | 3 → 4 | 4 → 1 |
| Carnot | S | T | S | T |
| Rankine | S | P | S | P |
| Brayton | S | P | S | P |
| Otto | S | v | S | v |
| Diesel | S | P | S | v |
| Stirling | T | V | T | V |
| Ericsson | T | P | T | P |
| Atkinson | S | V | S | P |



Ecuación de Clapeyron

$$\frac{dP^\circ}{dT} = \frac{\Delta\hat{H}_v}{T(\hat{V}_g - \hat{V}_l)}$$

Para gases ideales

$$\frac{d(\ln P^\circ)}{d(1/T)} = \frac{\Delta\hat{H}_v}{R}$$

T = temperatura absoluta

\hat{V}_g = volumen molar específico del gas

\hat{V}_l = volumen molar específico del líquido

$\Delta\hat{H}_v$ = entalpía de vaporización

P° = presión de vapor

R = constante de los gases

Ecuación de Clausius-Clapeyron

$$\frac{d \ln P^{\text{sat}}}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT^2}$$

$$\frac{d \ln P^{\text{sat}}}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{sub}}}{RT^2}$$

B = constante específica

P° = presión de vapor

$\Delta H_{\text{vap,sub}}$ = entalpía de vaporización o
sublimación

R = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta

Ecuaciones de Clausius- Clapeyron integradas

$$\ln P^\circ = -\frac{\Delta\hat{H}_v}{R} + B$$

Ecuación de Antoine

$$\log_{10} P^\circ = A - \frac{B}{T + C}$$

P° = presión de vapor

A, B, C = constantes específicas para cada
sustancia

T = temperatura



Ley de los gases ideales

Ecuación de estado

$$PV = nRT$$

Para Estado 1 y Estado 2, donde n y R permanecen constantes:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

V = volumen

n = mol de gas

P = presión total

T = temperatura absoluta

R = constante universal de los gases

Para presiones parciales

$$P_A = P_T \hat{\gamma}_A$$

P_A = presión parcial del gas A

P_T = presión total de la mezcla

$\hat{\gamma}_A$ = fracción mol del gas A en la mezcla



Relaciones termodinámicas para gases ideales

| Proceso | Energía interna (ΔU) | Entalpía (ΔH) | Calor (Q) | Trabajo (W) | Entropía (ΔS) |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---|---|
| Isotérmico irreversible | $\Delta U = 0$ | $\Delta H = 0$ | $Q = W$ | $W = P_{op} (V_2 - V_1)$ | $\Delta S = nR \ln \frac{V_2}{V_1}$ |
| Isotérmico reversible | $\Delta U = 0$ | $\Delta H = 0$ | $Q = W$ | $W = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$ | $\Delta S = \int_{V_1}^{V_2} nR \frac{dV}{V}$ |
| Isocórico | $\Delta U = C_v \Delta T$ | $\Delta H = C_p \Delta T$ | $Q_v = \Delta U = \Delta E$ | $W = 0$ | $\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$ |
| Isobárico | $\Delta U = C_v \Delta T$ | $\Delta H = C_p \Delta T$ | $Q_p = \Delta H$ | $W = P_{op} (V_2 - V_1)$ | $\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$ |
| Adiabático irreversible | $\Delta U = C_v \Delta T$ | $\Delta H = C_p \Delta T$ | $Q = 0$ | $W = P_{op} (V_2 - V_1)$ | $\Delta S = 0$ |
| Adiabático reversible | $\Delta U = -W$ | $\Delta H = C_p \Delta T$ | $Q = 0$ | $W = \frac{nRT}{1-\gamma} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma}$ | $\Delta S = 0$ |

ΔU = energía interna

ΔH = entalpía

Q = calor

W = trabajo

ΔS = entropía

P_{op} = presión de operación

V_1, V_2 = volumen inicial y final

T_1, T_2 = temperatura inicial y final

P_1, P_2 = presión inicial y final

ΔT = diferencia de temperatura final e inicial

n = mol

R = constante de los gases

C_v = calor específico a volumen constante

C_p = calor específico a presión constante



Factor acéntrico de Pitzer

$$\omega = -1 - \log(P_r^{sat}(T_r = 0.7))$$

$$P_r^{sat} = \frac{P_r^{sat}}{P_c}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

ω = factor acéntrico

P_r^{sat} = presión reducida de saturación

T_r = temperatura reducida

P^{sat} = presión de vapor

T_c = temperatura crítica

P_c = presión crítica

Factor de compresibilidad

$$Z = Z^o + \omega Z^1$$

$$Z^o = 1 + B^0 \frac{P_r}{T_r}$$

$$Z^1 = B^1 \frac{P_r}{T_r}$$

Z = factor de compresibilidad

ω = factor acéntrico

P_r = presión reducida

T_r = temperatura reducida

T_c = temperatura crítica

P_c = presión crítica

Correlaciones de M.M. Abbott

$$B^0 = 0.083 - \frac{0.422}{T_r^{1.6}}$$

$$B^1 = 0.139 - \frac{0.172}{T_r^{4.2}}$$

Potenciales termodinámicos

Energía Interna

$$U = U(S, V)$$

$$dU = T dS - P dV$$

S = entropía

V = volumen

P = presión total

T = temperatura absoluta

Entalpía

$$H = U + PV$$

$$H(S, P)$$

$$dH = T dS + V dP$$

Energía libre de Helmholtz

$$A = U - TS$$

$$A = (T, V)$$

$$dA = -SdT - PdV$$

Energía libre de Gibbs (entalpía libre)

$$G = H - TS$$

$$G = (T, P)$$

$$dG = -SdT + VdP$$



Energía libre de Gibbs en una reacción

$$\Delta G_r = \sum_{i=1}^n (v_i \Delta G_f)_{\text{productos}} - \sum_{i=1}^n (v_i \Delta G_f)_{\text{reactivos}}$$

v_i = coeficientes estequimétricos
 ΔG_f = cambio de la energía libre de Gibbs de formación de reactivos/productos

Entalpía total de una reacción

$$\Delta H_r^\circ = \sum_{i=1}^n (v_i \Delta H_f^\circ)_{\text{productos}} - \sum_{i=1}^n (v_i \Delta H_f^\circ)_{\text{reactivos}}$$

$$\Delta H(T) = \Delta H_r^\circ + \int_{T_0}^T C_p(T) dT$$

$\Delta H(T)$ = cambio de entalpía total a una temperatura T
 ΔH_r° = cambio entalpía de reacción a condiciones estándar
 ΔH_f° = cambio de entalpía de formación a condiciones estándar
 C_p = expresión para el calor específico dependiente de la temperatura

Relación entre la termodinámica y el equilibrio químico

$$\Delta G = -nRT \ln k_{eq}$$

ΔG = cambio de la energía libre de Gibbs
R = constante universal de los gases
 k_{eq} = constante de equilibrio de la reacción

Variación de la energía libre de Gibbs

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

la condición de equilibrio es $\Delta G = 0$
la condición de espontaneidad es $\Delta G < 0$
el proceso no es espontáneo cuando $\Delta G > 0$

A presión constante

(ecuación de Gibbs-Helmholtz)

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\Delta G}{T} \right)}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right)_P = \Delta H$$

T_1, T_2 = temperatura en el punto 1 y 2

$\Delta G_{(T_1)}^\circ, \Delta G_{(T_2)}^\circ$, = cambio en energía libre

estándar de Gibbs a T_1 y T_2

$\Delta H_{(T_1)}^\circ$ = cambio de formación de entalpía
estándar a T_1

Forma integrada

$$\frac{\Delta G_{(T_2)}^\circ}{T_2} - \frac{\Delta G_{(T_1)}^\circ}{T_1} = \Delta H_{(T_1)}^\circ \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right]$$



A temperatura constante

$$G(P_f) = G(P_i) + \int_{P_i}^{P_f} V dP$$

Si la sustancia es un líquido o sólido incomprensible

$$\hat{G}(P_f) = \hat{G}(P_i) + \hat{V} \cdot (P_f - P_i)$$

Si la sustancia es un gas ideal

$$G = G^\circ + nRT \ln \frac{P}{P^\circ}$$

$G(P_i), G(P_f)$ = energía libre de Gibbs a la presión inicial y final

V = volumen

$\hat{G}(P_i), \hat{G}(P_f)$ = energía libre de Gibbs molar a la presión inicial y final

\hat{V} = volumen molar

G° = energía libre de Gibbs estándar del sistema de referencia

n = moles de sustancia

R = constante universal de los gases

T = temperatura

P = presión

P° = presión vapor

Fugacidad

$$G = G^\circ + nRT \ln \frac{f}{P^\circ}$$

$$f = \varphi P$$

$$\ln \varphi = \int_0^P \frac{Z-1}{P} dP$$

G° = energía libre de Gibbs estándar del sistema de referencia

f = fugacidad

φ = coeficiente de fugacidad

Z = factor de compresibilidad

n = moles de sustancia

R = constante universal de los gases

T = temperatura

P = presión

P° = presión vapor

Ley Raoult

$$y_i P = x_i P_i^{sat}$$

Presión de rocío

$$P = \frac{1}{\sum y_i / P_i^{sat}}$$



Presión de burbuja

$$P = \sum x_i P_i^{sat}$$

P_i^{sat} = presión de saturación

P = presión

x_i = fracción mol del componente i en estado líquido

y_i = Fracción mol del componente i en el estado vapor

Trabajo (sistema sin flujo) del sistema

$$W = \int_{V_1}^{V_2} [P(V)] dV$$

W = trabajo del sistema

$P(V)$ = función de presión que depende del volumen

$V(P)$ = función de volumen que depende de la presión

n = mol

X = fracción mol del componente

$$W = \Delta(PV) - \int_{P_1}^{P_2} [V(P)] dP$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \left[P \left(\frac{\partial V}{\partial X} \right)_n \right] (X) \right\} dX$$

Trabajo (sistema fluyendo) del sistema

$$W = \int_P^{P_2} [V(P)] dP$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} [P(V)] dV - \Delta(PV)$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \left[V \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)_n \right] (X) \right\} dx$$



Calor del sistema

$$Q = \int_{S_1}^{S_2} [T(S)] dS$$

$$Q = \Delta(TS) - \int_{T_1}^{T_2} [S(T)] dT$$

$$Q = \Delta(TS) - \int_{T_1}^{T_2} [S(T)] dT$$

$$Q = \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \left[T \left(\frac{\partial S}{\partial X} \right)_n \right] (X) \right\} dX$$

Q = calor del sistema

$T(S)$ = función de temperatura que depende de la entropía

$S(T)$ = función de entropía que depende de la temperatura

n = mol

X = fracción mol del componente

La ecuación fundamental de la Termodinámica

$$dU = TdS - PdV$$

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S dV$$

Relaciones de Maxwell

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left(\frac{\partial P}{\partial S} \right)_V$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)_P$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = - \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T$$

Reglas de las fases de Gibbs

$$L = C - F + 2$$

L = grados de libertad

C = número de componentes

F = número de fases en equilibrio

Ecuaciones de estado

Virial

$$Z = \frac{P\hat{V}}{RT} = 1 + \frac{B}{\hat{V}} + \frac{C}{\hat{V}^2} + \frac{D}{\hat{V}^3} + \dots \text{ Serie de potencias de } \frac{1}{\hat{V}^n}$$

parámetros:

$$B' = \frac{B}{RT}$$

$$Z = \frac{P\hat{V}}{RT} = 1 + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + \dots \text{ Series de potencias de } \rho$$

$$C' = \frac{C-B}{RT^2}$$

$$Z = \frac{P\hat{V}}{RT} = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots \text{ Serie de potencias de } P$$

$$D' = \frac{D-3BC+2B^2}{RT^3}$$



Van der Waals

$$P = \frac{RT}{\hat{V} - b} - \frac{a}{\hat{V}^2}$$

parámetros:

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{1}{8} \frac{RTc}{P_c}$$

Redlich-Kwong

$$P = \frac{RT}{\hat{V}-b} - \frac{a T^{-0.5}}{\hat{V}(\hat{V}+b)}$$

parámetros:

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{P_c}$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$$

Soave-Redlich-Kwong

$$P = \frac{RT}{\hat{V}-b} - \frac{a(T)}{\hat{V}(\hat{V}+b)}$$

parámetros:

$$a(T) = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha(T_r, \omega)$$

$$\alpha(T_r, \omega) = \left[1 + m(\omega) \left(1 - T_r^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2$$

$$m(\omega) = 0.48 + 1.574 \omega - 0.176 \omega^2$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$$

Peng-Robinson

$$P = \frac{RT}{\hat{V}-b} - \frac{a(T) \cdot \alpha(T_r, \omega)}{(\hat{V}^2 + 2b\hat{V} - b^2)}$$

parámetros:

$$a(T) = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$\alpha(T_r, \omega) = \left[1 + m(\omega) \left(1 - T_r^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2$$

$$m(\omega) = 0.37464 + 1.54226 \omega - 0.26992 \omega^2$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c}$$

Constante de Equilibrio

$$K_i = \frac{y_i}{x_i}$$



Cálculos del Equilibrio Líquido Vapor

| Cálculo | Datos | Incógnitas | Criterio |
|------------------------|-------------------------|--|---|
| Presión de burbuja | T, {x _i } | P, {y _i } | $\sum K_i x_i - 1 = 0$ |
| Temperatura de burbuja | P, {x _i } | T, {y _i } | $\sum K_i x_i - 1 = 0$ |
| Presión de rocío | T, {y _i } | P, {x _i } | $\frac{\sum y_i}{K_i - 1} = 0$ |
| Temperatura de rocío | P, {y _i } | T, {x _i } | $\frac{\sum y_i}{K_i - 1} = 0$ |
| Flash isotérmico | T, P, {z _i } | L, V, {y _i }, {x _i } | $x_i = \frac{z_i}{[1 + (K_i - 1)V]}$ $y_i = K_i x_i = \frac{K_i z_i}{[1 + (K_i - 1)V]}$ $\sum_{i=1}^C y_i = 1$ $\sum_{i=1}^C x_i = 1$ $\sum_{i=1}^C y_i - \sum_{i=1}^C x_i = 0$ $\sum_{i=1}^C \frac{z_i(K_i - 1)}{[1 + (K_i - 1)V]} = 0^*$ <p>* Ecuación de Rachford-Rice</p> |



| Cálculo | Datos | Incógnitas | Criterio |
|------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Flash adiabático | H_F , $\{z_i\}$, P | $\{x_i\}$, $\{y_i\}$, V , T | $\frac{\sum z_i(K_i - 1)}{[1 + (K_i - 1)V]} = 0$ $H_F - H_V - H_L = 0$ $x_i = \frac{z_i}{[1 + (K_i - 1)V]}$ $y_i = K_i x_i = \frac{z_i K_i}{[1 + (K_i - 1)V]}$ |

Fuente. Smith-Van Ness. (s/f). Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, Mc Graw Hill, 4ta edición, capítulo 12

T = temperatura de equilibrio

$\{z_i\}$ = composición global del sistema

P = presión de equilibrio

V = flujo de vapor

$\{y_i\}$ = composición del compuesto i del vapor

L = flujo de líquido

$\{x_i\}$ = composición del compuesto i líquido

Sistema binario no ideal

$$y_1 P = \gamma_1 x_1 P^\circ$$

y_i = fracción mol del vapor

$$y_2 P = \gamma_2 x_2 P^\circ$$

x_i = fracción mol del líquido

γ_i = coeficiente de actividad del componente i

α_{12} = volatilidad relativa del componente 1 con respecto al 2

Volatilidad relativa del componente 1 con respecto al 2

$$\alpha_{12} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\left(\frac{y_1}{x_1}\right)}{\left(\frac{y_2}{x_2}\right)}$$

Balance de energía para una reacción

$$Q = \xi \Delta H^\circ r + \sum \dot{n}_{\text{salida}} \hat{H}_{\text{salida}} - \sum \dot{n}_{\text{entrada}} \hat{H}_{\text{entrada}}$$

v_A = coeficiente estequiométrico de un reactivo o producto

ξ = avance de reacción

$\Delta H^\circ r$ = entalpía de reacción en condiciones estándar

$$\xi = \frac{n_{A \text{ salida}} - n_{A \text{ entrada}}}{v}$$



Ley de Fick de la difusión binaria

Coordenadas rectangulares

$$J_{AX} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad J_{Ay} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} \quad J_{Az} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

Coordenadas cilíndricas

$$J_{Ar} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} \quad J_{A\theta} = -D_{AB} \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \theta} \quad J_{Az} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

Coordenadas esféricas

$$J_{Ar} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} \quad J_{A\theta} = -D_{AB} \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \theta} \quad J_{A\varphi} = -D_{AB} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial C_A}{\partial \varphi}$$

Ecuación de Nernst

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln(Q)$$

E = potencial corregido del electrodo
E° = potencial del electrodo en condiciones estándar.

R = constante universal de los gases

T = temperatura (absoluta)

n = número de moles de electrones participantes en la reacción

F = constante de Faraday (F = 96 500 C/mol)

Q = cociente de reacción

Para la reacción $aA + cB \rightarrow cC + dC$,
el cociente es

$$Q = \frac{\prod_j a_j^{n_j}}{\prod_i a_i^{n_i}} = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

a_i, a_j = es la actividad de los productos y reactivos respectivamente

n_i, n_j = es el coeficiente estequiométrico de los productos y reactivos respectivamente

Modelos de transferencia de momentum

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$



La ecuación de continuidad en distintos sistemas coordenados

Coordenadas rectangulares (x, y, z)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0$$

Coordenadas cilíndricas (r, θ, z)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho r v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0$$

Ecuaciones de movimiento en distintos sistemas coordenados

Coordenadas rectangulares (x, y, z)

En función de τ:

Componente x

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x$$

Componente y

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y$$

Componente z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

En términos de los gradientes de velocidad para fluidos newtonianos, con densidad y viscosidad constantes:

Componente x

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

Componente y

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

Componente z



$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

Coordinadas cilíndricas (r, θ, z)

En función de τ :

Componente r

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta \theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

Componente θ

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta$$

Componente z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z}$$

En términos de los gradientes de velocidad para fluidos newtonianos, con densidad y viscosidad constantes:

Componente r

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \right] + \rho g_r$$

Componente θ

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) \right] + \rho g_\theta \end{aligned}$$

Componente z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\left[r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \right] + \rho g_z$$

Ley de Newton para determinar viscosidad

$$t = \frac{F}{A} = M \frac{du}{dy}$$



Difusión en estado estacionario de A a través del no difundente B

$$N_A = \frac{D_{AB} \cdot P_T}{R \cdot T \cdot z \cdot p_{B,M}} (p_{A1} - p_{A2})$$

$$p_{B,M} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln\left(\frac{p_{B2}}{p_{B1}}\right)}$$

Contradifusión equimolal en estado estacionario

$$N_A = \frac{D_{AB}}{R \cdot T \cdot z} (p_{A1} - p_{A2})$$

Fórmula de pérdida de calor al entorno

$$q_{2s} = A_2 F_{2s} (E_{b2} - E_{bs}) + A_2 E_{b2}$$

Análisis de grados de libertad en un proceso

El número de grados de libertad del proceso se calcula como:

$$n_{df} = n_{incógnitas} - n_{ec. \text{ indep.}}$$

Considerando:

- $n_{df} = 0$, existe una solución única
- $n_{df} > 0$, sistema subespecificado
- $n_{df} < 0$, sistema sobreespecificado

Número de Sherwood

$$Sh = \frac{h_{masa} L_c}{D_{AB}}$$



Resistencias térmicas

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_{\text{convección}} + \sum R_{\text{conducción}}}$$

| Coordenadas | Convección | Conducción |
|---------------|------------------------|---|
| Rectangulares | $\frac{L}{kA}$ | $\frac{1}{hA}$ |
| Cilíndricas | $\frac{1}{h2\pi r L}$ | $\frac{\ln\left(\frac{r_L}{r_i}\right)}{2\pi L k}$ |
| Esféricas | $\frac{1}{4\pi r^2 h}$ | $\frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_j} \right)$ |

Q = flujo de calor [W]

ΔT = diferencia de temperatura [°C]

R = resistencias [W/°C]

L = longitud [m]

A = área [m²]

k = conductividad térmica [W/(m °C)]

h = coeficiente de convección [W/(m² °C)]

r = radio [m]

Balance de energía de un sistema abierto en estado transitorio

$$\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right)_{\text{ent}} F_{\text{ent}} - \left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right)_{\text{sal}} F_{\text{sal}} + dQ - dW = d \left[\left(U + \frac{v^2}{2} + gz\right) M \right]_{\text{sal}}$$

H = entalpía específica

v = velocidad

g = gravedad

z = posición

F = flujo máscico

Q = calor

W = trabajo

U = energía interna

M = masa



Análisis y diseño de procesos de transformación básica

Ley de viscosidad-Newton

Casos representativos en coordenadas rectangulares

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \left[\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = -\mu \left[\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right]$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = -\mu \left[\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right]$$

Casos representativos en coordenadas cilíndricas

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = -\mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right]$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = -\mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right]$$

$$\tau_{rz} = \tau_{rz} = -\mu \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]$$

Flujo entre dos secciones de un conducto

$$Q_1 = Q_2$$

Q = flujo volumétrico

A = área de sección transversal

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

v = velocidad promedio de sección

La ecuación de energía térmica en distintos sistemas coordinados

En función de q, densidad constante

Coordenadas rectangulares (x, y, z)

$$\rho \hat{C}_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - \tau: \nabla v + \emptyset$$

Coordenadas cilíndricas (r, θ, z)

$$\rho \hat{C}_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - \tau: \nabla v + \emptyset$$



Coordenadas esféricas (r, θ, ϕ)

$$\rho \hat{C}_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 q_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (q_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial q_\phi}{\partial \phi} \right) - \tau : \nabla v + \emptyset$$

En función de T, densidad y conductividad constantes

Coordenadas rectangulares (x, y, z)

$$\rho \hat{C}_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \tau : \nabla v + \emptyset$$

Coordenadas cilíndricas (r, θ, z)

$$\rho \hat{C}_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \tau : \nabla v + \emptyset$$

Coordenadas esféricas (r, θ, ϕ)

$$\begin{aligned} \rho \hat{C}_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \\ = k \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right) - \tau : \nabla v + \emptyset \end{aligned}$$

Nota:

El término $\tau : \nabla v$ es la disipación viscosa

El término \emptyset representa una fuente o sumidero de calor

Ley de conducción de calor de Fourier

Coordenadas rectangulares

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

Coordenadas cilíndricas

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad q_\theta = -k \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$



Coordenadas esféricas

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad q_\theta = -k \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad q_\varphi = -k \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \varphi}$$

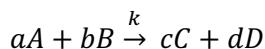
Ley de Stefan-Boltzmann

$$q = AF\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

F = factor de visión

$$\sigma = 4.878 \times 10^{-8} \text{ kcal}/\text{hm}^2\text{K}^4$$

Ecuación de la ley de velocidad de una reacción



Balance molar para A en un reactor por lotes a volumen constante

$$-\frac{dC_A}{dt} = r_A$$

$$-r_A = k C_A^\alpha C_B^\beta$$

$-r_A$ = velocidad de reacción

k = constante de velocidad de reacción

α = orden de reacción con respecto a A

β = orden de reacción con respecto a B

n = orden global de la reacción; $n = \alpha + \beta$

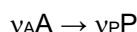
C_i = concentración molar de la especie cinéticamente activa i

Las formas integradas para un modelo cinético del tipo

$$-r_A = k C_A^\alpha$$

Selectividad

En una reacción química:



v = es el coeficiente estequiométrico, la selectividad de un producto deseado P (S_P) = que consume $n_{A,0} - n_A$ moles del reactivo A para obtener n_P moles del producto deseado, se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_P = \frac{n_p/v_p}{(n_{A,0} - n_A)/v_A}$$



Donde α puede ser 0,1,2 o n se dan a continuación

| Orden de reacción | Balance molar | Balance molar integrado | Unidades de k | Gráfica lineal para determinación de k |
|------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|--|
| Cero | $\frac{dC_A}{dt} = -k$ | $C_A = C_{A0} - kt$ | $\frac{mol}{l s}$ | $C_A \text{ vs } t$ |
| Primer | $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A$ | $C_A = C_{A0}e^{-kt}$ | $\frac{1}{s}$ | $\ln C_A \text{ vs } t$ |
| Segundo | $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^2$ | $\frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{A0}} + kt$ | $\frac{l}{mol s}$ | $\frac{1}{C_A} \text{ vs } t$ |
| n^{avo} | $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^n$ | $\frac{1}{C_A^{n-1}} = \frac{1}{C_{A0}^{n-1}} + (n - 1)kt$ | $\frac{l^{n-1}}{mol^{n-1}}$ | $\frac{1}{C_A^{n-1}} \text{ vs } t$ |

Ecuación de Arrhenius

$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

k = constante de velocidad de reacción

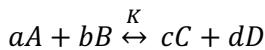
E_a = energía de activación

A = factor de frecuencia o factor pre-exponencial

R = constante universal de los gases

Constante de equilibrio

Para la reacción



$$K_a = \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b}$$

$$K_a = e^{-\frac{\Delta G_T^\circ}{RT}}$$

$$\Delta G_r^\circ = \sum_{i=1}^n v_i \Delta G_{f,i}^\circ$$

$$\Delta H_r^\circ = \sum_{i=1}^n v_i \Delta H_{f,i}^\circ$$



$$\Delta S_r^\circ = \sum_{i=1}^n v_i S_i^\circ$$

$$\Delta G_r^\circ = \Delta H_r^\circ - \Delta S_r^\circ$$

conversión del reactivo limitante:

$$a_A = C_A = C_{A0}(1-X_A)$$

$$a_B = C_B = C_{A0} \left(M_B - \frac{b}{a} X_A \right)$$

$$M_B = \frac{C_{B0}}{C_{A0}}$$

$$a_R = C_R = C_{A0} \left(M_R + \frac{r}{a} X_A \right)$$

$$M_R = \frac{C_{R0}}{C_{A0}}$$

$$a_S = C_S = C_{A0} \left(M_S + \frac{s}{a} X_A \right)$$

$$M_S = \frac{C_{S0}}{C_{A0}}$$

X_A = conversión del reactivo limitante

Constante de equilibrio químico en función de la temperatura Ecuación de Van't Hoff

$$\ln \frac{K_{T_2}}{K_{T_1}} = - \frac{\Delta H_r^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

ΔH_r° = entalpía de reacción estándar
R = constante universal de los gases
T = temperatura absoluta
K = constante de equilibrio



Calor intercambiado

$$Q = -m_c C_{p_c} (T_2 - T_1) = m_f C_{p_f} (t_2 - t_1)$$

Q = flujo de calor

m_c = flujo másico

C_{p_c} = capacidad calorífica del fluido caliente
(constante o promedio)

T_1 = temperatura de entrada del fluido caliente

T_2 = temperatura de salida del fluido caliente

C_{p_f} = capacidad calorífica del fluido frío
(constante o promedio)

t_2 = temperatura de entrada del fluido frío

t_1 = temperatura de salida del fluido frío

Calor con cambio de fase

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}}$$

Q_{Total} = flujo de calor total

Q_{sensible} = flujo de calor sensible

Q_{latente} = flujo de calor latente

m = flujo másico

C_p = capacidad calorífica del fluido

T_1 = temperatura inicial del fluido

T_2 = temperatura final del fluido

λ = calor por cambio de fase del fluido

Ecuación básica de transferencia de calor

$$Q = U_0 * A_0 * \text{LMTD}$$

U_0 = coeficiente global de transferencia de calor referido al área externa de transferencia de calor

A_0 = área externa de transferencia de calor

LMTD = media logarítmica de temperaturas

Transferencia de calor por convección

$$Q = h * A * (T_\infty - T_s)$$

Q = flujo de calor por convección

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor

A = área de transferencia de calor

T_∞ = temperatura del fluido

T_s = temperatura de la superficie

Coeficiente Convectivo de transferencia de calor, h

$$h = \frac{Nu * k}{L}$$

Nu = número de Nusselt

k = conductividad térmica

L = longitud



Coeficiente Global de transferencia de calor, U0

$$U_0 = \frac{h_i h_0}{h_i + h_0}$$

U₀ = coeficiente global de transferencia de calor referido a el área externa de transferencia de calor
h₀ = coeficiente de película exterior
h_i = coeficiente de película interior

Factor de ensuciamiento

$$R_d = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_0}$$

R_d = factor de ensuciamiento
U₀ = coeficiente global de transferencia de calor limpio
U_D = coeficiente global de transferencia de calor sucio

Número de tubos

$$N_t = \frac{A_0}{\pi D_0 L N_s}$$

N_t = número de tubos en un intercambiador de calor
A₀ = área calculada de trasferencia de calor
D₀ = diámetro exterior de los tubos
L = longitud de los tubos
N_s = número de pasos

Media logarítmica de diferencias de temperatura

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}}$$

T₁ = temperatura de entrada del fluido caliente
T₂ = temperatura de salida del fluido caliente
t₂ = temperatura de entrada del fluido frío
t₁ = temperatura de salida del fluido frío

Corrección de LMTD eficiencias térmicas R y S

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)}$$

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

$$MTD = LMTD * F_T$$

T₁ = temperatura de entrada del fluido caliente
T₂ = temperatura de salida del fluido caliente
t₁ = temperatura de entrada del fluido frío
t₂ = temperatura de salida del fluido frío
LMTD = media logarítmica de diferencias de temperaturas
MTD = media logarítmica de diferencias de temperaturas corregida
F_T = factor de corrección



Intercambiadores de placa

Área por placa

$$A_p = L * W$$

A_p = área de placa

L = largo de placa

W = ancho de placa

Número de placas

$$N_p = \frac{A}{A_p}$$

N_p = número de placas

A = área de transferencia de calor requerida

Economía del proceso de evaporación

$$Economía = \frac{S}{m_s}$$

m_s = flujo másico de vapor alimentado al evaporador

S = flujo másico del vapor generado en el evaporador

Torres de enfriamiento

Altura de torre de enfriamiento

$$Z = HTU * NTU$$

Unidades de transferencia

$$NTU = \int_{H1}^{H2} \frac{dH}{H^* - H}$$

Humidificación

Entalpía para mezclas aire – vapor

$$H = [0.24 + 0.46 * Y] * (T - 0) + 596 * Y [=] \frac{kcal}{kg_{aire\ seco}}$$

Volumen Húmedo se calcula como:

$$V_H = \left[\frac{1}{PM_{gas}} + \frac{Y}{PM_{vapor}} \right] * \frac{R * T}{P_t} [=] \frac{m^3}{kg_{aire\ seco}}$$

Ósmosis inversa

Ley de Kohlrausch

$$\lambda^0 = \lambda_+^0 + \lambda_-^0$$

λ_+^0, λ_-^0 = conductividad iónica molar



Ecuación de Onsager

$$\lambda_m = \lambda^0 - (0.2273 * \lambda^0 + 59.78) * \sqrt{C}$$

C = concentración

λ_m = conductividad molar

Concentración

$$C = \frac{1\,000 * K}{\lambda_m} [=] \frac{mol}{l}$$

K = conductividad

Destilación

Composición del azeótropo

$$x_i = y_i$$

$$\alpha_{12} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\left(\frac{y_1}{x_1}\right)}{\left(\frac{y_2}{x_2}\right)}$$

$\alpha_{12} = 1$ para el azeótropo

$$\alpha_{12} = \gamma_1^\infty \left(\frac{P_1^S}{P_2^S} \right) a x_1 = 0$$

$$\alpha_{12} = \left(\frac{1}{\gamma_2^\infty} \right) \left(\frac{P_1^S}{P_2^S} \right) a x_1 = 1$$

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{P_2^S}{P_1^S} \text{ para la composición azeotrópica}$$

y_i = fracción mol del vapor

x_i = fracción mol del líquido

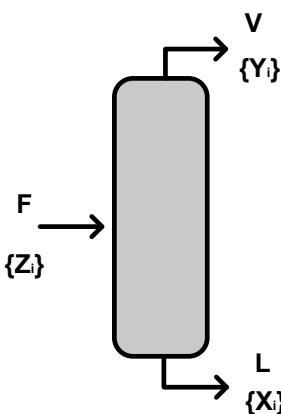
γ_i = coeficiente de actividad del componente i

α_{12} = volatilidad relativa del componente 1 con respecto al 2

γ_i^∞ = coeficiente de actividad a dilución

infinita del componente i

P_i^S = presión de vapor saturado del componente i





Líneas de operación columna (McCabe-Thiele)

Línea de rectificación

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}$$

Línea de agotamiento

$$y = \frac{S+1}{S}x - \frac{x_B}{S}$$

Línea de alimentación (McCabe-Thiele)

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{z_F}{q-1}$$

R = relación de reflujo en el condensador de la columna $\left[\frac{L}{D} \right]$

S = relación de reflujo en el ebullidor de la columna $\left[\frac{V}{B} \right]$

y, x = composiciones (vapor y líquido respectivamente) de los flujos que se cruzan entre cada etapa

x_D, x_B = composiciones (destilado y fondos respectivamente) de los productos de la columna de destilación

q = condición térmica de la alimentación $\left[\frac{L-L}{F} \right]$

z_F = composición de la alimentación (fracción mol)

Ecuación de Rayleigh para sistemas binarios de volatilidad constante

$$\ln\left(\frac{W_0}{W}\right) = \frac{1}{\alpha-1} \left[\ln\left(\frac{x_0}{x}\right) + \alpha * \ln\left(\frac{1-x}{1-x_0}\right) \right]$$

W₀ = mol del componente más volátil en la corriente de alimentación

W = mol del componente más volátil en la corriente residual

α = volatilidad

x₀ = fracción mol del componente más volátil en la alimentación

x = fracción mol del componente más volátil en el líquido residual



Método de Ponchon Savarit

$$q = \frac{H_V - h_F}{H_V - h_l}$$

$$R_{min} = \frac{H_{op,min} - H_{v_{xD}}}{H_{v_{xD}} - h_{l_{xD}}}$$

$$R = \frac{H_{op} - H_{v_{xD}}}{H_{v_{xD}} - h_{l_{xD}}}$$

q = condición térmica de la alimentación

R_{min} = relación de reflujo mínimo

R = relación de reflujo

H_v = entalpía de vapor

h_F = entalpía de alimentación

h_l = entalpía de líquido

H_{op} = entalpía de operación

Ecuaciones para métodos cortos

Ecuación de Fenske

$$N_m = \frac{\ln \left[\frac{\left(\frac{d}{b} \right)_{lk}}{\left(\frac{d}{b} \right)_{hk}} \right]}{\ln \alpha_{lk}}$$

Distribución de componentes no claves

$$\left(\frac{d}{b} \right)_{nk} = \left(\frac{f - b}{b} \right)_{nk} = \left(\frac{d}{b} \right)_{lk} \left(\frac{\alpha_{nk}}{\alpha_{lk}} \right)^{N_m}$$

o,

$$\left(\frac{d}{b} \right)_{nk} = \ln \left(\frac{d}{b} \right)_{lk} + N_m \ln \left(\frac{\alpha_{nk}}{\alpha_{lk}} \right)$$

Ecuación de Underwood, primera

$$\sum_{i=1}^c \frac{\alpha_i x_{F_i}}{\alpha_i - \theta} = 1 - q$$



Ecuación de Underwood, segunda, (reflujo mínimo)

$$R_m + 1 = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^c \frac{\alpha_i d_i}{\alpha_i - \theta}$$

o,

$$R_m + 1 = \sum_{i=1}^c \frac{\alpha_i x_{D_i}}{\alpha_i - \theta}$$

Correlación de Gilliland

$$X = \frac{R - R_m}{R + 1}$$

$$Y = \frac{N - N_m}{N + 1} = 1 - \exp \left[\left(\frac{1 + 54.4X}{11 + 117.2X} \right) \left(\frac{X - 1}{X^{0.5}} \right) \right]$$

donde:

- d_i = moles de destilado del componente i por mol de destilado total
- b_i = moles de fondo del componente i por mol de fondo total
- α_i = volatilidad del componente i
- x_{F_i} = composición de la alimentación del componente i
- x_{D_i} = composición del destilado del componente i
- d_i = moles de destilado del componente i
- θ = parámetro de las ecuaciones de Underwood
- q = condición térmica de la alimentación
- D = moles de destilado totales
- R_m = relación de reflujo mínima
- R = relación de reflujo de operación
- N = número de etapas teóricas
- N_m = número mínimo de etapas
- X e Y = parámetros de la correlación de Gilliland

Subíndices:

- $I = 1, \dots, c$, = componentes
- lk = componente clave ligero
- hk = componente clave pesado
- nk = componente no clave



Número de ecuaciones necesarias para la separación continua de los componentes mediante métodos rigurosos (MESH)

No. de ecuaciones = N (2C + 3)

N = número de etapas

C = número de componentes

Altura de la cama empacada en función de unidades de transferencia

$$z = H_G \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)(y-y_i)} dy$$

$$z = H_L \int_{x_2}^{x_1} \frac{(1-x)_{iM}}{(1-x)(x_i-x)} dx$$

$$z = H_{OG} \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{*M}}{(1-y)(y-y^*)} dy$$

$$z = H_{OL} \int_{x_2}^{x_1} \frac{(1-x)_{*M}}{(1-x)(x^*-x)} dx$$

H_G, H_L = altura de una unidad de transferencia basada en la película de gas y líquidos, respectivamente

N_G, N_L = número de una unidad de transferencia basada en la película de gas y líquidos, respectivamente

x = composiciones de líquido

y = composiciones de gas

i. = interface

* = equilibrio

Altura de la cama empacada en función de unidades de transferencia (soluciones diluidas)

$$z = H_G N_G = H_G \left[\frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)} \right]_{prom} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y-y_i)}$$

$$z = H_L N_L = H_L \left[\frac{(1-x)_{iM}}{(1-x)} \right]_{prom} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(x_i-x)}$$

$$z = H_{OG} N_{OG} = H_{OG} \left[\frac{(1-y)_{*M}}{(1-y)} \right]_{prom} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y-y^*)}$$

$$z = H_{OL} N_{OL} = H_{OL} \left[\frac{(1-x)_{*M}}{(1-x)} \right]_{prom} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(x^*-x)}$$



Alturas de torres empacadas

$$HETP = \frac{HTU * \ln\left(\frac{mG_m}{L_m}\right)}{\left(\frac{mG_m}{L_m - 1}\right)}$$

Anillos Rasching

$$HTU_G = \frac{\psi S_{C_g}^{0.5}}{(Lf_1f_2f_3)^{0.6}} \left(\frac{D'}{12}\right)^{1.24} \left(\frac{Z}{10}\right)^{1/3}$$

Sillas Berl

$$HTU_G = \frac{\psi S_{C_g}^{0.5}}{(Lf_1f_2f_3)^{0.5}} \left(\frac{D'}{12}\right)^{1.11} \left(\frac{Z}{10}\right)^{1/3}$$

$$HETP = K_1 G^{k_2} D'^{k_3} Z^{1/3} \frac{\alpha * \mu'_L}{\rho'_L}$$

D_G = coeficiente de Difusión Gaseosa

D' = diámetro de la columna (in)

$f_1 = (\mu_L / 2.42)^{0.16}$

$f_2 = (62.4 / \rho_L) 1.25$

$f_3 = (72.8 / \sigma)^{0.8}$

G = flujo MÁSICO de gas (lb/h ft²)

G_m = flujo molar de gas por unidad de superficie

HTU = altura de una unidad de transferencia de fase gaseosa

HETP = altura de relleno equivalente a un plato teórico

K_1, K_2, K_3 , = constantes de la siguiente tabla

L_m = flujo molar de líquido por unidad de superficie

L = flujo MÁSICO de líquido por unidad de superficie (lb/h ft²)

m = pendiente de la recta de operación

Sc_G = número de Schmidt

Z = altura del empaque (ft)

μ_L = viscosidad de líquido (lb / ft h)

μ'_L = viscosidad de líquido (cp)

ρ_L = densidad de líquido (lb/pie³)

ρ'_L = densidad de líquido (g/cm³)

σ = tensión superficial (dina/cm)

ψ = parámetro de material de relleno

Constantes de empaques

| Empaque | Tamaño (in) | Constantes del empaque | | |
|------------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| | | K_1 | K_2 | K_3 |
| Anillos | 1/4 | - | - | - |
| | 3/8 | 2.1 | -0.37 | 1.24 |
| | 1/2 | 8.53 | -0.34 | 1.24 |
| | 1 | 0.57 | -0.1 | 1.24 |
| | 2 | 0.42 | 0 | 1.24 |
| Sillas o monturas | 1/2 | 5.62 | -0.45 | 1.11 |
| | 1 | 0.76 | -0.14 | 1.11 |
| McMahon | 1/4 | 0.017 | 0.5 | 1 |
| | 3/8 | 0.2 | 0.25 | 1 |
| | 1/2 | 0.33 | 0.2 | 1 |
| Empaques estructurados | 0.16 | 0.39 | 0.25 | 0.3 |
| | 0.24 | 0.076 | 0.5 | 0.3 |
| | 0.48 | 0.45 | 0.3 | 0.3 |
| | 1 | 3.06 | 0.12 | 0.3 |
| Stedman | 2 | 0.077 | 0.48 | 0.24 |
| | 3 | 0.363 | 0.26 | 0.24 |
| | 6 | 0.218 | 0.32 | 0.24 |



Balances molares para reactor intermitente (o por lotes)

En función de mol o conversión

$$\frac{dN_A}{dt} = r_A V$$

$$-N_{A0} \frac{dX_A}{dt} = r_A V$$

En función de concentración para volumen constante

$$\frac{dC_A}{dt} = r_A$$

Balances molares para reactor tipo tanque agitado

En función de flujos o conversión

$$V = \frac{F_A - F_A}{-r_A}$$

$$V = \frac{F_{A0} X_A}{-r_A}$$

En función de concentración para flujo volumétrico constante

$$V = \frac{V_0(C_{A0} - C_A)}{-r_A}$$

Balances molares para reactor tubular con flujo pistón

En función de flujo o conversión

$$\frac{dF_A}{dV} = r_A$$

$$\frac{dX_A}{dV} = \frac{-r_A}{F_{A0}}$$

En función de concentración para flujo volumétrico constante

$$V_0 \frac{dC_A}{dV} = r_A$$

C_A = concentración molar de A

C_{A0} = concentración de A en la alimentación

X_A = conversión de A

V = volumen

V_0 = flujo volumétrico

F_A = flujo molar de A

F_{A0} = flujo molar de A en la alimentación

N_A = mol de A

r_A = velocidad de producción de A

$-r_A$ = velocidad de reacción de A



Balances de energía para reactores adiabáticos

Reactor por lotes o intermitente

$$X_A = \frac{\sum \theta_i \bar{Cp}_i (T - T_0)}{-[\Delta H_{rxn}^0 + \Delta Cp(T - T_{ref})]}$$

$$T = T_0 + \frac{-[\Delta H_{rxn}(T_0)] X_A}{\sum \theta_i \bar{Cp}_i + X_A \Delta Cp}$$

donde:

$$\theta_i = \frac{F_{io}}{F_{Ao}}$$

$$\Delta Cp = \sum \nu_i \bar{Cp}_i$$

Reactor de tanque agitado o tubular con flujo pistón

$$X_A = \frac{\sum \theta_i \bar{Cp}_i (T - T_o)}{-[\Delta H_{rxn}^0 + \Delta Cp(T - T_{ref})]}$$

$$T = \frac{X_A \Delta H_{rxn}^0 + \sum \theta_i \bar{Cp}_i T_0 + X_A \Delta Cp T_{ref}}{\sum \theta_i \bar{Cp}_i + X_A \Delta Cp}$$

ν_i = coeficiente estequiométrico en la reacción general

\bar{Cp}_i = capacidad calorífica promedio de la especie i

T = temperatura del reactor

T_o = temperatura de alimentación (para reactores continuos); temperatura inicial para reactores intermitentes

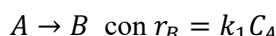
T_{ref} = temperatura de referencia para ΔH_{rxn}^0

ΔH_{rxn}^0 = calor de reacción a temperatura de referencia T_{ref}

$\Delta H_{rxn}(T_o)$ = calor de reacción evaluado a T_o

X_A = conversión de A

Selectividad para sistemas de reactores con reacciones múltiples en paralelo



$$S = \frac{r_B}{r_C} = \frac{k_1 C_A}{k_2 C_A^2} = \frac{A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_A}{A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) C_A^2}$$

A_1 = factor pre-exponencial de reacción 1

A_2 = factor pre-exponencial de reacción 2

C_A = concentración molar de A

E_1 = energía de activación de reacción 1

E_2 = energía de activación de reacción 2

R = constante universal de gases

S = selectividad

r_B = velocidad de producción de B

r_C = velocidad de producción de C

T = temperatura (absoluta)



Reactores de flujo no ideal

Funciones de distribución de tiempo de residencia

Alimentación de trazador tipo pulso

$$E = \frac{C}{\int_0^\infty C dt}$$

$$F = \int_0^t Edt$$

Tiempo de residencia medio

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty t Edt}{\int_0^\infty Edt}$$

Funciones de distribución de tiempo de residencia

Alimentación de trazador tipo escalón

$$E = \frac{d}{dt} \left[\frac{C}{C_0} \right]$$

$$F = \frac{C}{C_0}$$

Tiempo adimensional

$$\theta = \frac{t}{\tau}$$

Ecuación de Ergun

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 \bar{V}_0 \mu (1 - \varepsilon)^2}{\phi_S^2 D_P^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75 \rho \bar{V}_0^2 (1 - \varepsilon)}{\phi_S D_P \varepsilon^3}$$

Cálculo de la concentración del reactivo que se encuentra dentro del sistema en un reactor intermitente

$$C_B = \frac{C_{B0} V_0}{(V_0 + \dot{V}_0 t) \exp(kt)}$$

Cálculo de la concentración del reactivo que se alimenta al sistema en un reactor intermitente

$$C_B = \frac{C_{B0} V_0 + \frac{\dot{V}_0 C_{BE}}{k} [\exp(kt) - 1]}{(V_0 + \dot{V}_0 t) \exp(kt)}$$

Cálculo de la concentración de un reactivo en un reactor discontinuo (batch)

$$C_B = C_{B0} \exp(-kt)$$



Modelo Kunii-Levenspiel para dimensionamiento de reactores de lecho fluidizado con reacción de primer orden

Peso de catalizador en un reactor de lecho fluidizado con reacción de primer orden

$$w = \frac{v_b \left(\frac{\pi D_T^2}{4} \right) (1 - \delta)(1 - \varepsilon_{mf})}{K_R k_{obs}} \ln \left(\frac{1}{1 - f_A} \right)$$

$$K_R = \left\{ \frac{\rho_P k_{obs}}{K_{bn}} + \left[\gamma_n + \left(\frac{1}{\gamma_e} + \frac{\rho_P k_{obs}}{K_{ne}} \right)^{-1} \right]^{-1} \right\}^{-1} + \gamma_b$$

Altura de lecho en un reactor de lecho fluidizado con reacción de primer orden

$$h = \frac{w}{\left(\frac{\pi D_T^2}{4} \right) (1 - \delta)(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_P}$$

Fracción volumen del lecho ocupada por burbujas

$$\delta = \frac{V_0 - V_{mf}}{V_b - V_{mf}(1 + \alpha)} \approx \frac{V_0 - V_{mf}}{V_b}$$

Velocidad de burbujas

$$v_b = v_0 - v_{mf} + 0.711 \sqrt{g d_b}$$

v_b = es la velocidad de ascenso de burbujas

D_T = es el diámetro del lecho

δ = es la fracción volumen de burbujas en el lecho

ε_{mf} = es la fracción vacía mínima de fluidización

k_{obs} = es la constante observada o aparente de velocidad de reacción de primer orden, que en este caso tiene unidades de volumen entre masa de catalizador entre tiempo (correspondiente a una rapidez catalítica en moles entre masa entre tiempo)

f_A = es la fracción conversión de reactivo de referencia

K_{bn} y K_{ne} = son coeficientes de transferencia de masa entre burbuja y nube y nube y emulsión, respectivamente

γ_b , γ_n y γ_e = son las fracciones volumétricas de catalizador en la burbuja, nube y emulsión, respectivamente, con respecto al volumen de burbuja

α = es la relación entre el volumen de la estela y el volumen de la burbuja

d_b = es diámetro promedio de las burbujas

v_{mf} = es la velocidad mínima de fluidización



Velocidad mínima de fluidización para partículas esféricas

$$v_{mf} = \frac{d_p^2}{150\mu} [g(\rho_p - \rho_g)] \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}}$$

d_p = es diámetro promedio de las partículas
 ρ_p y ρ_g = son las densidades de partícula y del gas, respectivamente
 μ = es la viscosidad dinámica del gas

Fracción vacía mínima de fluidización para partículas esféricas

$$\varepsilon_{mf} = 0.586 \left[\frac{\mu^2}{\rho_g g (\rho_p - \rho_g) d_p^3} \right]^{0.029} \left(\frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^{0.021}$$

D_A = es la difusividad molecular del reactivo en la mezcla gaseosa

Los coeficientes de transferencia de masa entre burbuja y nube y entre nube y estela son, respectivamente:

$$K_{bn} = 4.5 \left(\frac{v_{mf}}{d_b} \right) + 5.85 \left(\frac{D_A^{0.5} g^{0.25}}{d_b^{1.25}} \right)$$

$$K_{ne} = 6.77 \left(\frac{\varepsilon_{mf} D_A v_b}{d_b^3} \right)^{0.5}$$

en caso de no proporcionarse como datos:

$$\gamma_n = (1 - \varepsilon_{mf}) \left[\frac{3(v_{mf}/\varepsilon_{mf})}{v_b - (v_{mf}/\varepsilon_{mf})} + \alpha \right]$$

$$\gamma_e = (1 - \varepsilon_{mf}) \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) - \gamma_n - \gamma_b$$



Bomba NPSH

NPSH disponible:

$$NPSH_d = \frac{P_{at}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - z - h_f$$

Pérdida de carga en tuberías $h_f = \Delta h_{12}$:

$$h_f = \Delta h_{12} = f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g}$$

P_{at} = presión atmosférica

P_v = presión vapor

ρ = densidad del fluido

Q = caudal

W = potencia de la bomba

f = coeficiente de fricción

D = diámetro de tubería

L = longitud de tubería

g = aceleración de gravedad

Altura de elevación de la bomba H :

$$H = \frac{W}{\rho \cdot g \cdot Q}$$

Balance de materia para el material del lecho

$$u_{br} = 0.711(gd_b)^{\frac{1}{2}}$$

$$u_b = u_0 - u_{mf} + u_{br}$$

$$\delta = \frac{u_0}{u_b}$$

Determinar fracción de vacíos: $\epsilon_f = 1 - (1 - \epsilon_{mf})(1 - \delta)$

Intercambio de gas entre la burbuja y la nube

$$k_{ce} = 6.77 \left(\frac{\epsilon_{mf} D u_{br}}{d_b^3} \right)^{1/2}$$

$$f_b + f_c + f_e$$

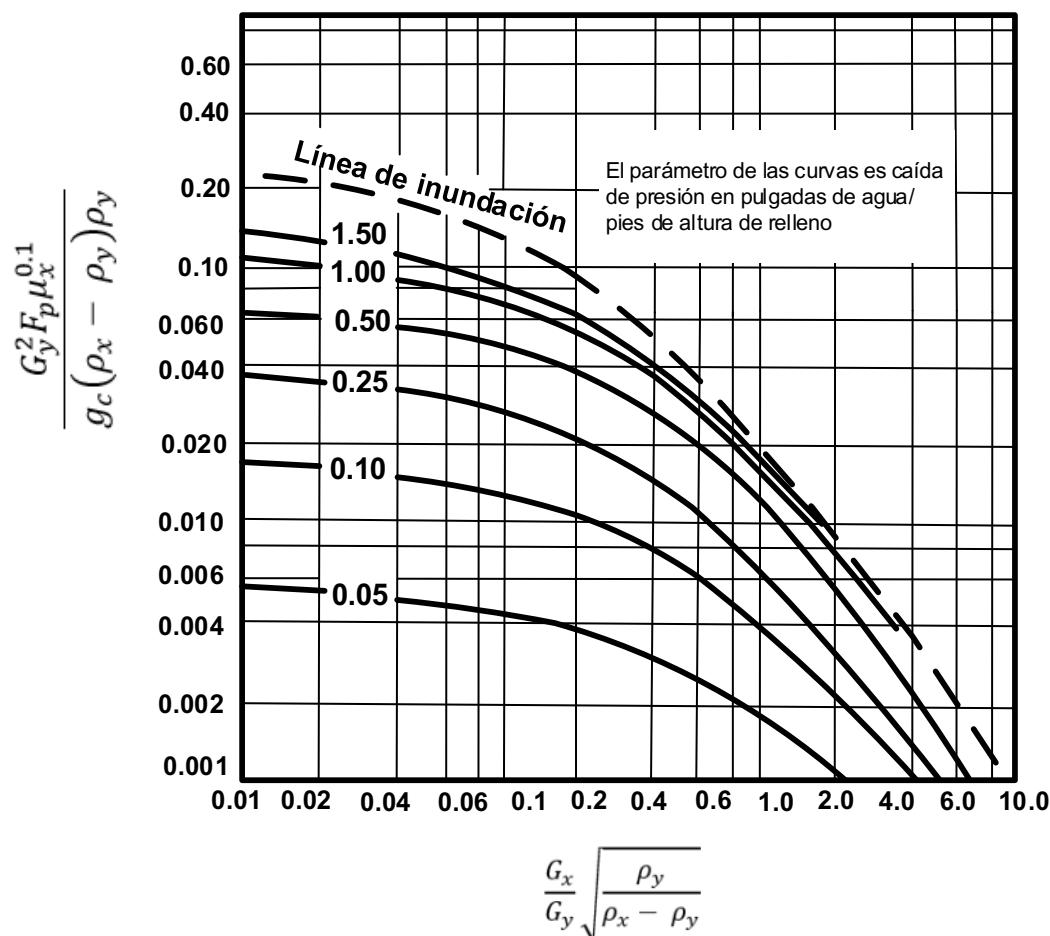
$$f_e = (1 - \epsilon_f) - f_b - f_c$$

$$H_{BFB} = \frac{W}{\rho_s A (1 - \epsilon_f)}$$

$$f_b k''' + \frac{1}{\delta \cdot k_{bc}} + \frac{1}{f_c k'''} + \frac{1}{\delta \cdot k_{ce}} + \frac{1}{f_e k'''}$$

$$\ln = \frac{C_{A0}}{C_A} = \frac{f_{total} H_{BFB}}{f_{total}} \cdot \frac{f_{total} H_{BFB}}{u_0}$$

Correlación generalizada para inundación y caída de presión en columnas de relleno. (Según Eckert)



Fuente: McCabe, W., Smith, J. y Harriott, P. (1991) Operaciones básicas de Ingeniería Química. Mc Graw Hill, p. 722.



Algunas Técnicas de Separación Basadas en el Equilibrio (parte I)

| Técnica | Fase de la alimentación/fases de los productos | Diferencia de la propiedad física | Cómo funciona | Ejemplos |
|----------------|--|--|---|---|
| Evaporación | Líquido/líquido y vapor | Presión de vapor (punto de ebullición) | La mezcla líquida se calienta hasta que una parte del material se vaporiza | La separación de butano del asfalto |
| Condensación | Vapor/líquido y vapor | Presión de vapor (punto de ebullición) | La mezcla de vapor se enfriá hasta que una parte del material se condensa | La recuperación de los compuestos orgánicos volátiles del gas de escape en una campana de humos |
| Destilación | Líquido o vapor/líquido y vapor | Presión de vapor (punto de ebullición) | Se alimenta la mezcla en una columna de múltiples etapas, donde evaporación y condensación se repiten | Separación del petróleo crudo en gasolina, turbosina, diésel, etcétera |
| Cristalización | Líquido/sólido y líquido | Solubilidad a temperaturas bajas (punto de fusión) | Se enfriá la solución hasta que se rebasa el límite de solubilidad | Purificación de la aspirina |
| Secado | Solución o suspensión/sólido y vapor | Presión de vapor | Se calienta la alimentación para volatilizar el disolvente, dejando atrás el sólido no volátil | Secado de películas fotográfica |

Fuente: Regina M. Murphy (2007). Introducción a los Procesos Químicos, McGraw Hill.

Algunas Técnicas de Separación Basadas en el Equilibrio (parte II)

| Técnica | Fase de la alimentación/fases de los productos | Diferencia de la propiedad física | Cómo funciona | Ejemplos |
|-------------|--|--|--|---|
| Absorción | Gas | Solubilidad del gas en el disolvente adicionado | La mezcla gaseosa entra en contacto con el disolvente; uno de los componentes del gas es más soluble en el disolvente | Separación de CO ₂ del H ₂ por la adición del disolvente etanolamina-agua |
| Adsorción | Fluido (gas o líquido) | Afinidad por la superficie sólida | El fluido entra en contacto con un material sólido; uno de los componentes de la mezcla se pega al sólido | Separación de las impurezas coloridas del jarabe de maíz mediante carbón |
| Lixiviación | Sólido | Solubilidad de los componentes sólidos en el disolvente adicionado | El sólido contiene componentes solubles e insolubles, los componentes solubles se disuelven en el disolvente adicionado | Recuperación de cafeína de los granos de café |
| Extracción | Líquido | Distribución entre dos fluidos inmiscibles | Un disolvente inmiscible entra en contacto con la alimentación; el soluto del fluido se reparte de preferencia en el disolvente adicionado | Purificación de antibióticos provenientes del caldo de cultivo |

Fuente: Regina M. Murphy (2007). Introducción a los Procesos Químicos, McGraw Hill.



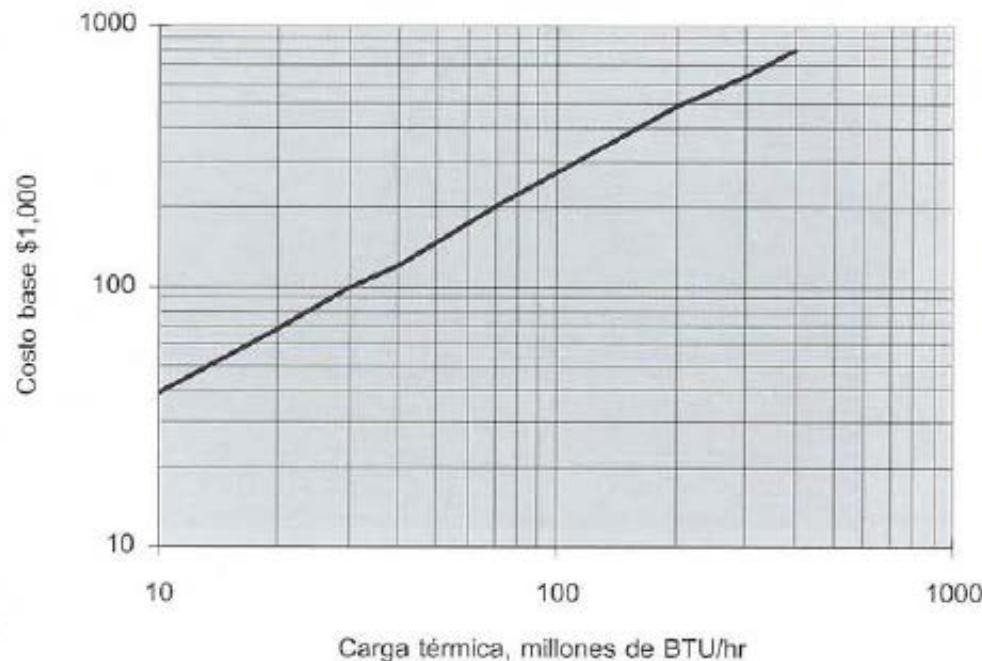
Diseño, optimización y control de procesos

Heurística para síntesis de secuencia de separación

Se pueden plantear los siguientes heurísticos o reglas para generar las secuencias:

1. Elegir el método de separación primero
2. Favorezca la secuencia directa
3. Reducir la carga de separación mediante la división y mezclado de corrientes
4. Tratar de separar los componentes más abundantes primero, si las cantidades son iguales separar en partes iguales
5. Separar componentes corrosivos y peligrosos primero
6. Hacer la separación más difícil al último
7. Evitar el uso de separaciones que requieren especies externas al proceso. Sin embargo, si se usa una especie externa separarla tan pronto como sea posible
8. Evitar el uso de temperaturas o presiones extremas, si esto no es posible, preferir las altas
9. En destilación obtener el producto deseado como destilado

Costo base para hornos de proceso





HORNOS DE PROCESO

Costo de un horno de proceso, \$ = [costo base(Fd + Fm + Fp)]

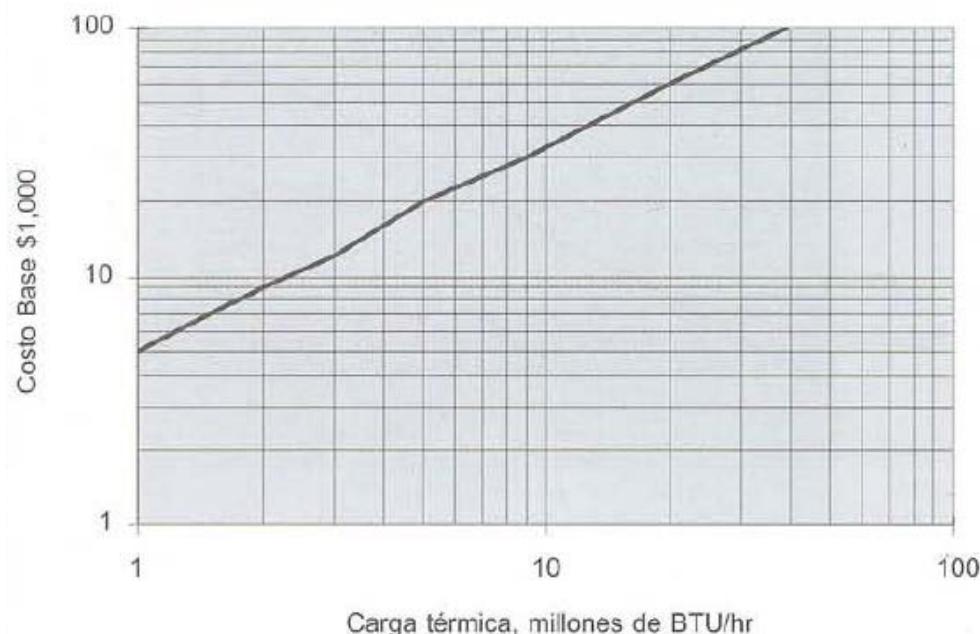
Costo de horno reformador o de pirólisis, \$ = [costo base(Fd + Fp)]

Factores de ajuste

| Tipo de diseño | Fd | Material de la tubería | Fm | Presión de diseño (psi) | Fp |
|------------------------------|------|------------------------|------|-------------------------|------|
| Calentador | 1.00 | Acero al carbón | 0.00 | Inferior a 500 | 0.00 |
| Pirólisis | 1.10 | Cromo/molibdeno | 0.35 | 1000 | 0.10 |
| Reformador (sin catalizador) | 1.35 | Inoxidable | 0.75 | 1500 | 0.15 |
| | | | | 2000 | 0.25 |
| | | | | 2500 | 0.40 |
| | | | | 3000 | 0.60 |

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté

Costo base para calentadores de fuego directo





CALENTADORES A FUEGO DIRECTO

Costo del calentador a fuego directo

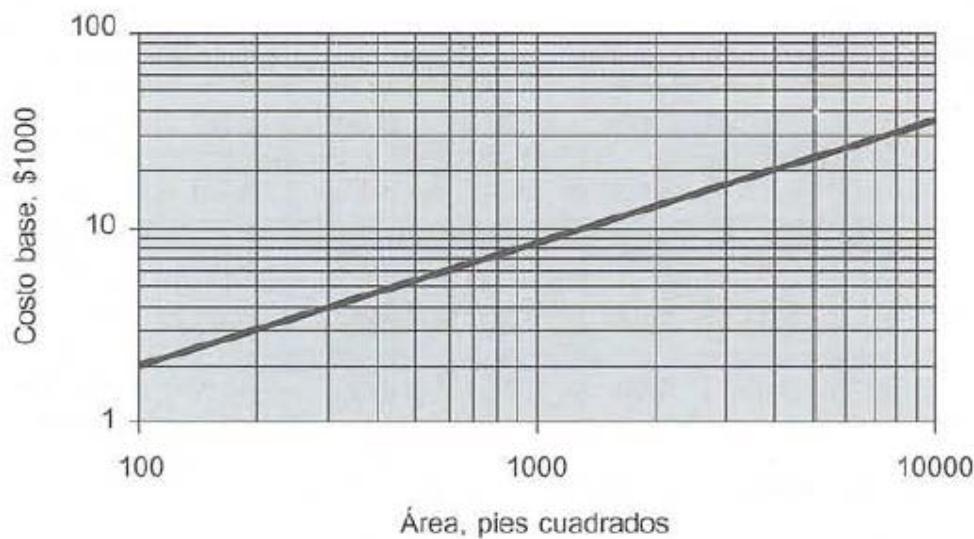
$$\$ = [\text{costo base}(F_d + F_m + F_p)]$$

Factores de ajuste

| Tipo de diseño | F _d | Material de la tubería | F _m | Presión de diseño (psi) | F _p |
|----------------|----------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| Cilíndrico | 1.00 | Acero al carbón | 0.00 | Inferior a 500 | 0.00 |
| Dowtherm | 1.33 | Cromo/molibdeno | 0.45 | 1000 | 0.15 |
| | | Acero inoxidable | 0.50 | 1500 | 0.20 |

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté

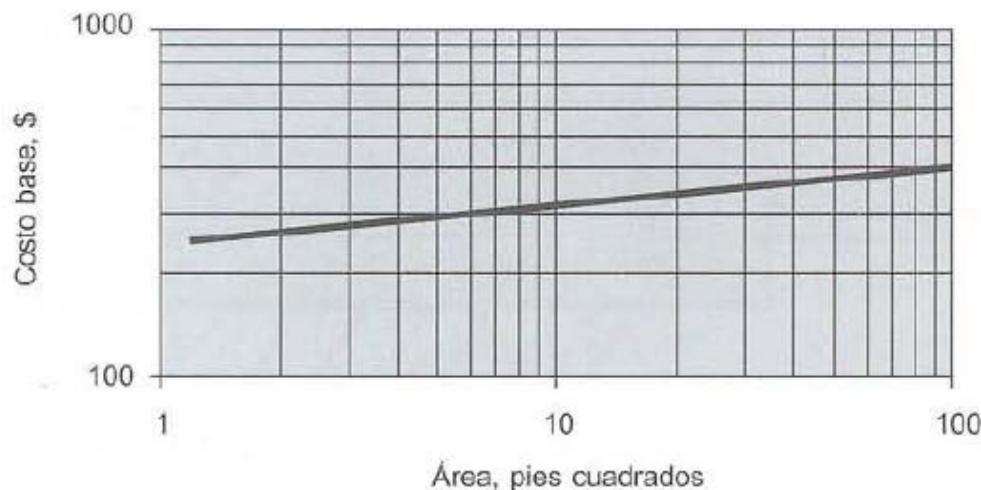
Costo base de intercambiadores de calor



Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté



Costo de intercambiadores de calor (áreas pequeñas)



INTERCAMBIADORES DE CALOR

Costo del intercambiador

$$\$ = [\text{costo base} (F_d + F_p) * F_m]$$

Factores de ajuste

| Tipo de diseño | F _d | Presión de diseño (psi) | F _p |
|---------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| Reboiler, Kettle | 1.35 | Inferior a 150 | 0.00 |
| Cabezal flotante | 1.00 | 300 | 0.10 |
| Tubo U | 0.85 | 400 | 0.25 |
| Hoja de tubos fijos | 0.80 | 800 | 0.52 |
| | | 1000 | 0.55 |

Material de la coraza / tubo, F_m

| Área, ft ² | AC/AC | AC/Latón | AC/Mo | AC/AI | AI/AI | AC/Monel | Monel/Monel | AC/Ti | Ti/Ti |
|-----------------------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| Inf. a 100 | 1.00 | 1.05 | 1.60 | 1.54 | 2.50 | 2.00 | 3.20 | 4.10 | 10.28 |
| 100 a 500 | 1.00 | 1.10 | 1.75 | 1.78 | 3.10 | 2.30 | 3.50 | 5.20 | 10.60 |
| 500 a 1000 | 1.00 | 1.15 | 1.82 | 2.25 | 3.26 | 2.50 | 3.65 | 6.15 | 10.75 |
| 1000 a 5000 | 1.00 | 1.30 | 2.15 | 2.81 | 3.75 | 3.10 | 4.25 | 8.95 | 13.05 |
| 5000 a 10000 | 1.00 | 1.52 | 2.50 | 3.52 | 4.50 | 3.75 | 4.95 | 11.1 | 16.60 |

INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO

Costo de intercambiadores de doble tubo (para procesos con requerimientos menores a 100 ft² con especificación de unidades de doble tubo).

Factores de ajuste

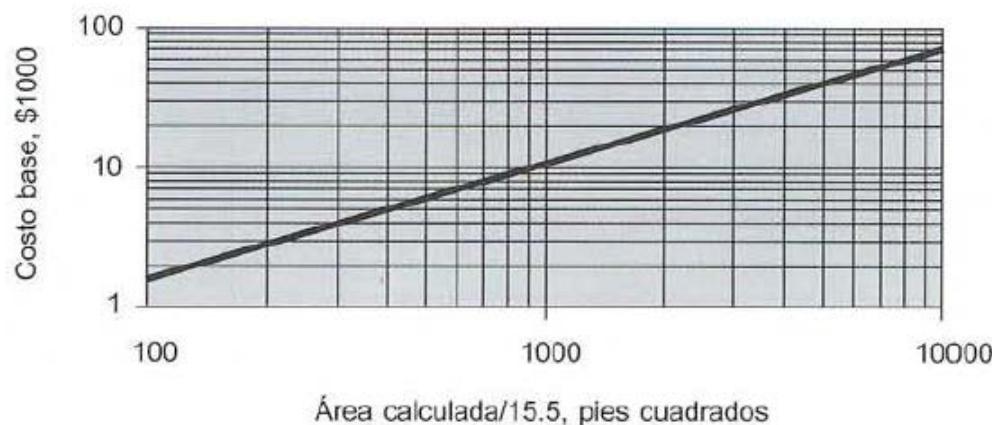
| Material | F _m | Presión (psi) | F _p |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| AG/AC | 1.00 | Inferior a 600 | 1.00 |
| AC/AI | 1.85 | 900 | 1.10 |
| | | 1000 | 1.25 |

Factores de módulo

| | |
|--------------------------------|------|
| Instalación de campo | 1.35 |
| Factor de módulo (normalizado) | 1.83 |

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté

Costo de enfriadores de aire





ENFRIADORES DE AIRE

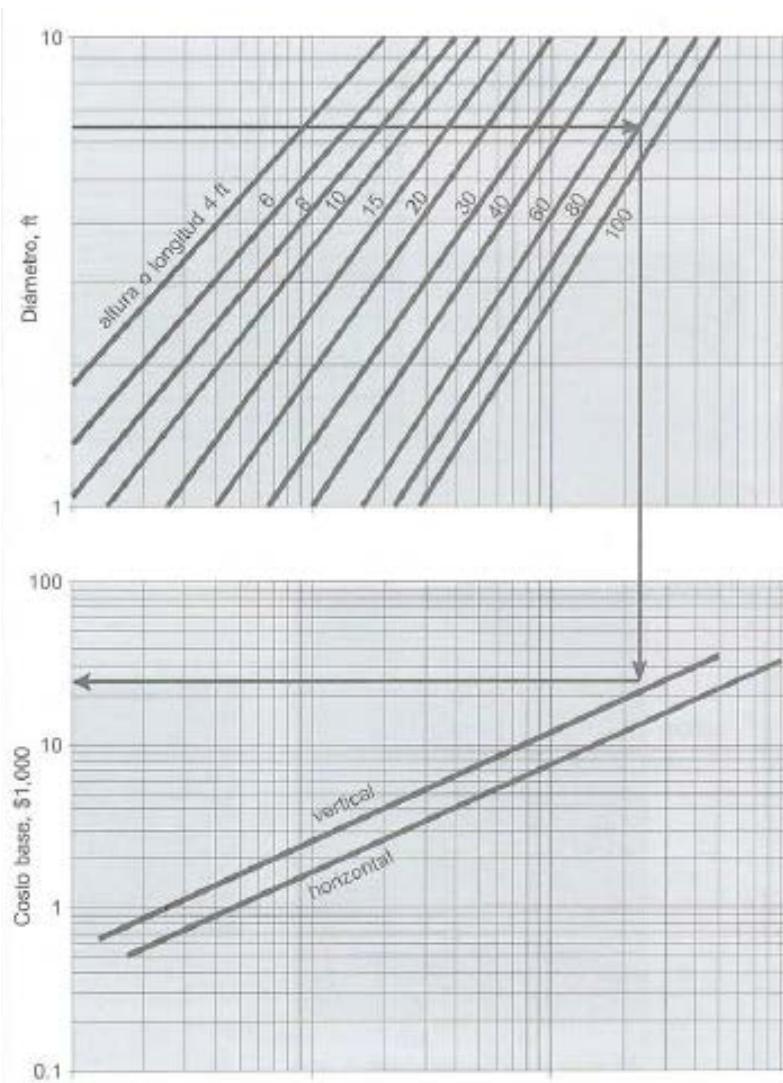
| Presión (psi) | Fp | Longitud de tubo (ft) | Ft | Material del tubo | Fm |
|---------------|------|-----------------------|------|-------------------|------|
| 150 | 1.00 | 16 | 0.00 | acero al carbón | 0.00 |
| 250 | 1.05 | 20 | 0.05 | aluminio | 0.50 |
| 500 | 1.10 | 24 | 0.10 | acero inoxidable | 1.85 |
| 1000 | 1.15 | 30 | 0.15 | monel | 2.20 |

Factores de ajuste

Costo de un enfriador $\$ = [\text{costo base} (F_p + F_t + F_m)]$

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté

Costo base de recipientes de proceso



RECIPIENTES DE PROCESO

Costo de recipientes de proceso

$$\$ = [\text{costo base} * F_m * F_p]$$

Factores de ajuste

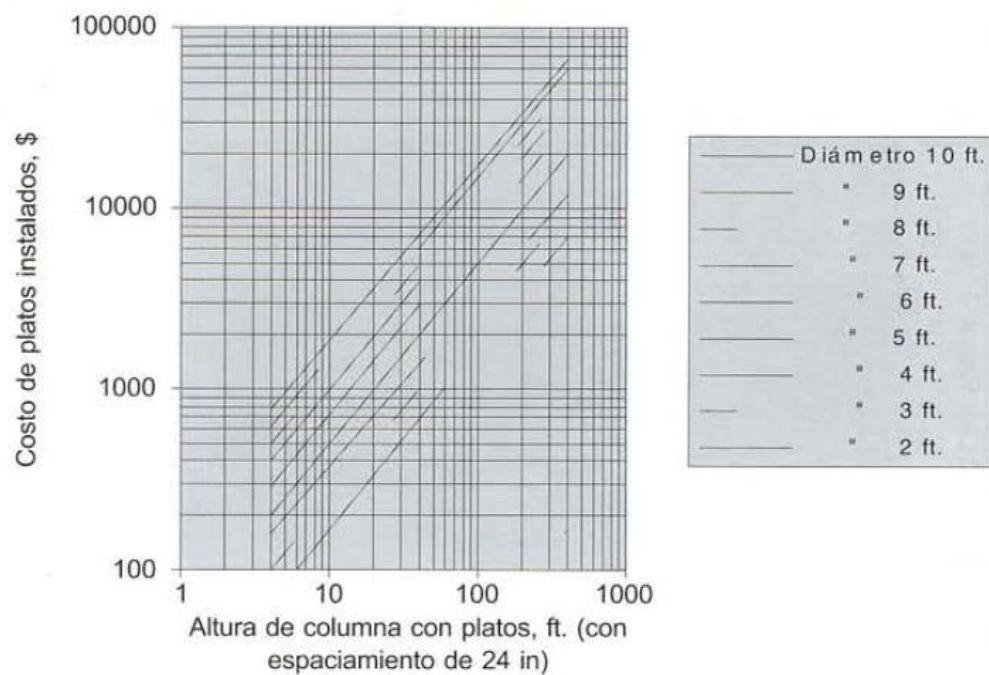
| Material de recubrimiento | F _m revestido | F _m sólido |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Acero al carbón | 1.00 | 1.00 |
| Inoxidable 316 | 2.25 | 3.67 |
| Monel | 3.89 | 6.34 |
| Titanio | 4.23 | 7.89 |

| Factor de presión (Psi) | F _p |
|-------------------------|----------------|
| Hasta 50 | 1.00 |
| 100 | 1.05 |
| 200 | 1.15 |
| 300 | 1.20 |
| 400 | 1.35 |
| 500 | 1.45 |
| 600 | 1.60 |
| 700 | 1.80 |
| 800 | 1.90 |
| 900 | 2.30 |
| 1000 | 2.50 |

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté



Costo de platos para columnas de destilación



Platos

Costo de platos, $\$ = [\text{costo base } (F_s + F_t + F_m)]$

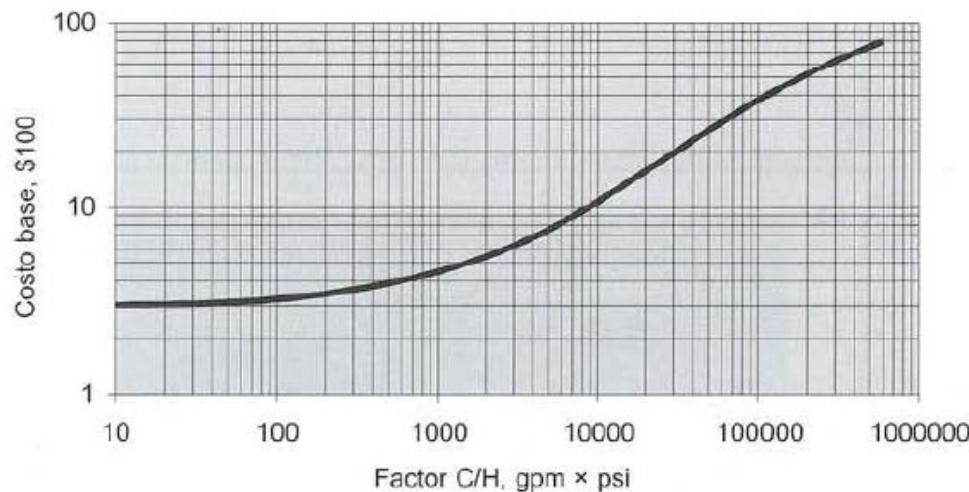
Factores de ajuste

| Espaciamiento entre platos (pulg) | F _s | Tipo de plato | F _t | Material del plato | F _m |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|--------------------|----------------|
| 24 | 1.0 | Rejilla (sin rebasadero) | 0.0 | Acero al carbón | 0.0 |
| 18 | 1.4 | Sieve | 0.0 | Acero inoxidable | 1.7 |
| 12 | 2.2 | Válvula | 0.4 | Monel | 8.9 |
| | | Campana de burbujeo | 1.8 | | |
| | | Cascada de Koch | 3.9 | | |



Costo base de bombas centrífugas

El factor C/H se refiere al producto de la capacidad en gpm por la carga dinámica total en psi



BOMBAS CENTRÍFUGAS

Costo de bombas centrífugas, $\$ = [\text{costo base} * F_m * F_o]$

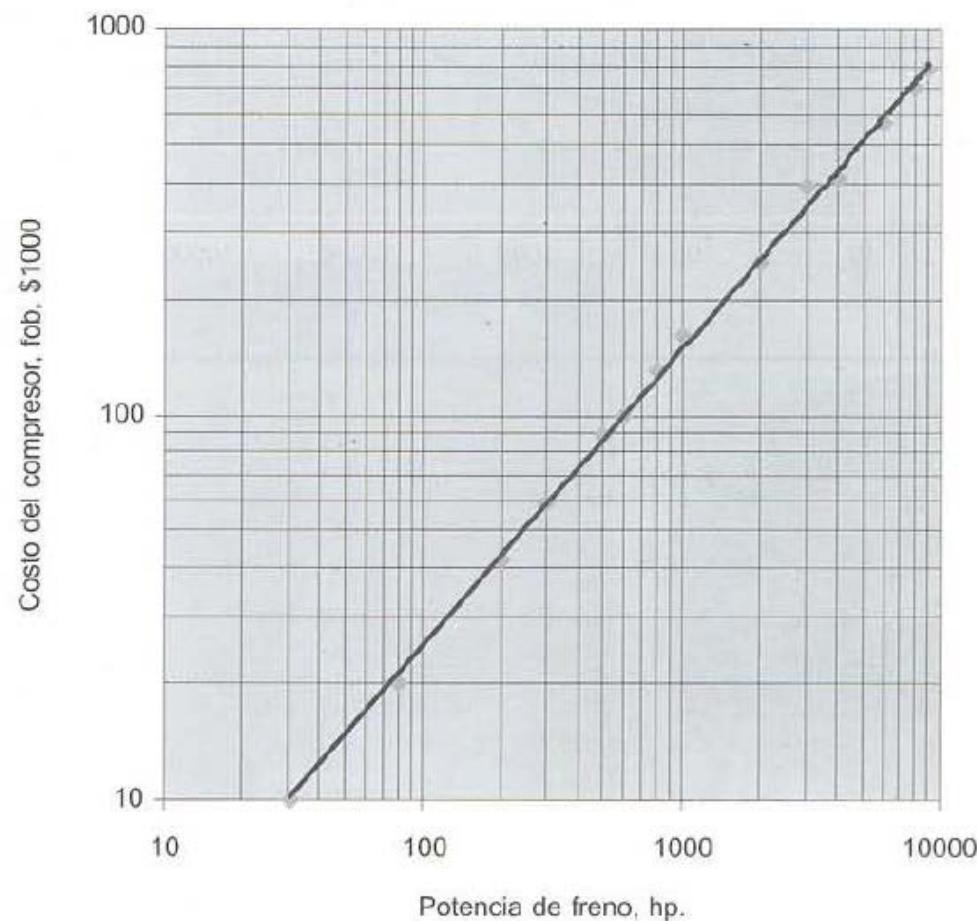
Factores de ajuste

| Material | Fm | Límites de operación | Valor máximo | | |
|------------------|------|-----------------------------|--------------|-----|------|
| | | | 150 | 500 | 1000 |
| Hierro moldeado | 1.00 | Presión de succión, psig | 150 | 500 | 1000 |
| Bronce | 1.28 | Temperatura del sistema, °F | 250 | 550 | 850 |
| Acero colado | 1.32 | | | | |
| Acero inoxidable | 1.93 | Factor Fo | 1.0 | 1.5 | 1.9 |
| Carpenter 20 | 2.10 | | | | |
| Worthite | 2.44 | | | | |
| Hastelloy C | 2.89 | | | | |
| Monel | 3.23 | | | | |
| Níquel | 3.48 | | | | |
| Titanio | 8.98 | | | | |

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté



Costo base de compresores de gases



COMPRESORES

Costo de compresor, $S = [\text{costo base} * F_d]$

| Tipo de diseño | F_d |
|--------------------------------|-------|
| Centrífuga / motor | 1.00 |
| Alternativo / vapor * | 1.07 |
| Centrífuga / turbina * | 1.15 |
| Alternativo / motor * | 1.29 |
| Alternativo / máquina de gas * | 1.82 |

* Incluyen recipientes de etapas internas y ventiladores pero no empaques u otras divisiones de flujos.

Fuente: Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química [E-book]. Editorial Reverté



Automatización de procesos

Sistemas de primer orden

$$G(S) = \frac{K}{\tau_c S + 1}$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta m} = K \left(1 - e^{-\tau/\tau_0} \right)$$

K = ganancia del sistema de primer orden

τ_c = constante de tiempo del sistema de primer orden

Δr = cambio en la variable de salida

Δm = cambio en la variable manipulada

Sistemas de segundo orden

Caso I $\vartheta < 1$

$$G(S) = \frac{K}{\tau^2 S + 2\vartheta\tau + 1}$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta m} = K \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\vartheta^2}} e^{\vartheta t/\tau} \sin \left(\sqrt{1-\vartheta^2} \frac{t}{\tau} + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\vartheta^2}}{\vartheta} \right) \right]$$

Sobretiro: $\exp \left(-\frac{\pi \vartheta}{\sqrt{1-\vartheta^2}} \right)$

Razón de decaimiento: $\exp \left(-\frac{2\pi \vartheta}{\sqrt{1-\vartheta^2}} \right)$

Tiempo de respuesta: $\pm 5\% \Delta$

Periodo de oscilación:

$$T[\text{tiempo/ciclo}] = \frac{2\pi\tau}{\sqrt{1-\vartheta^2}}$$

$$\omega(\text{radianes}) = \frac{\sqrt{1-\vartheta}}{2\pi\tau}$$

Caso II ($\vartheta = 1$)

$$G(S) = \frac{K}{\tau^2 S + 2\vartheta\tau + 1}$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta m} = K \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-t/\tau} \right]$$

Caso III ($\vartheta > 1$)

$$G(S) = \frac{K}{\tau^2 S + 2\vartheta\tau + 1}$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta m} = K \left[1 - e^{\vartheta t/\tau} \left(\cosh \sqrt{\vartheta^2 - 1} \frac{t}{\tau} + \frac{\vartheta}{\sqrt{\vartheta^2 - 1}} \sinh \sqrt{\vartheta^2 - 1} \frac{t}{\tau} \right) \right]$$

Funciones de transferencia de los controladores P, PI, PID

Controlador P: $G = K_p$

K_p = ganancia proporcional

Controlador PI: $G = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$

τ_i = constante de tiempo integral

τ_D = constante de tiempo derivativo

Controlador PID: $G = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D s \right)$



Método de la Sección Dorada para optimización univariable

$$x_1 = x_l + d$$

$$x_2 = x_u - d$$

$$d = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} (x_u - x_l)$$

Método de Fibonacci para optimización univariable

$$x_1 = x_l + d$$

Donde τ_i es la sucesión de Fibonacci, que es la relación de los números de Fibonacci (F_i):

$$x_2 = x_u - d$$

$$\begin{aligned} F_0 &= 1, F_1 = 1, F_2 = 2, F_3 = 3, F_4 = 5, F_6 \\ &\quad = 8 \dots \dots \end{aligned}$$

$$d = \tau_i(x_u - x_l)$$

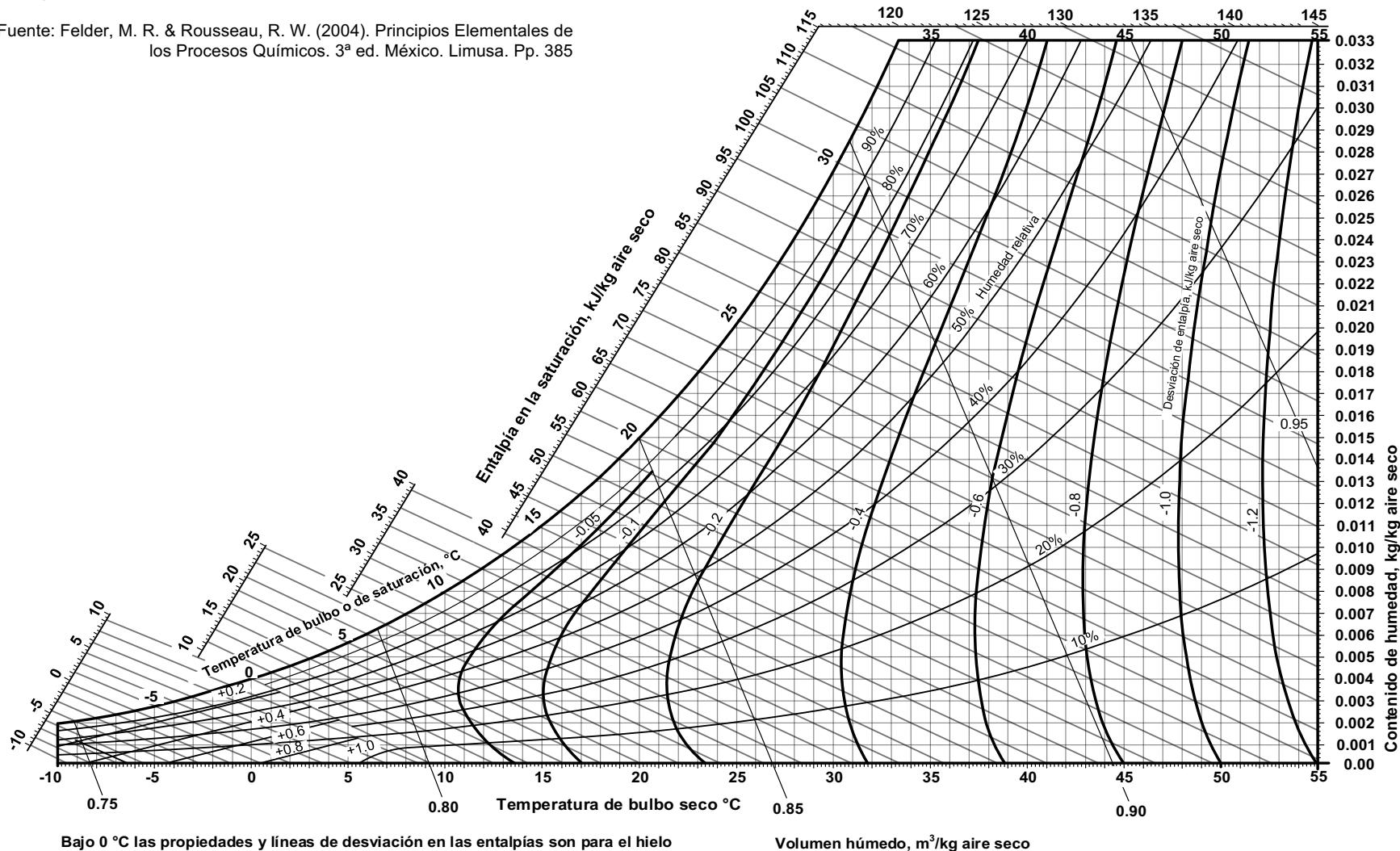
$$\tau_i = \frac{F_{n-1}}{F_n}$$



Gráficas y tablas

Diagrama psicrométrico

Fuente: Felder, M. R. & Rousseau, R. W. (2004). Principios Elementales de los Procesos Químicos. 3^a ed. México. Limusa. Pp. 385

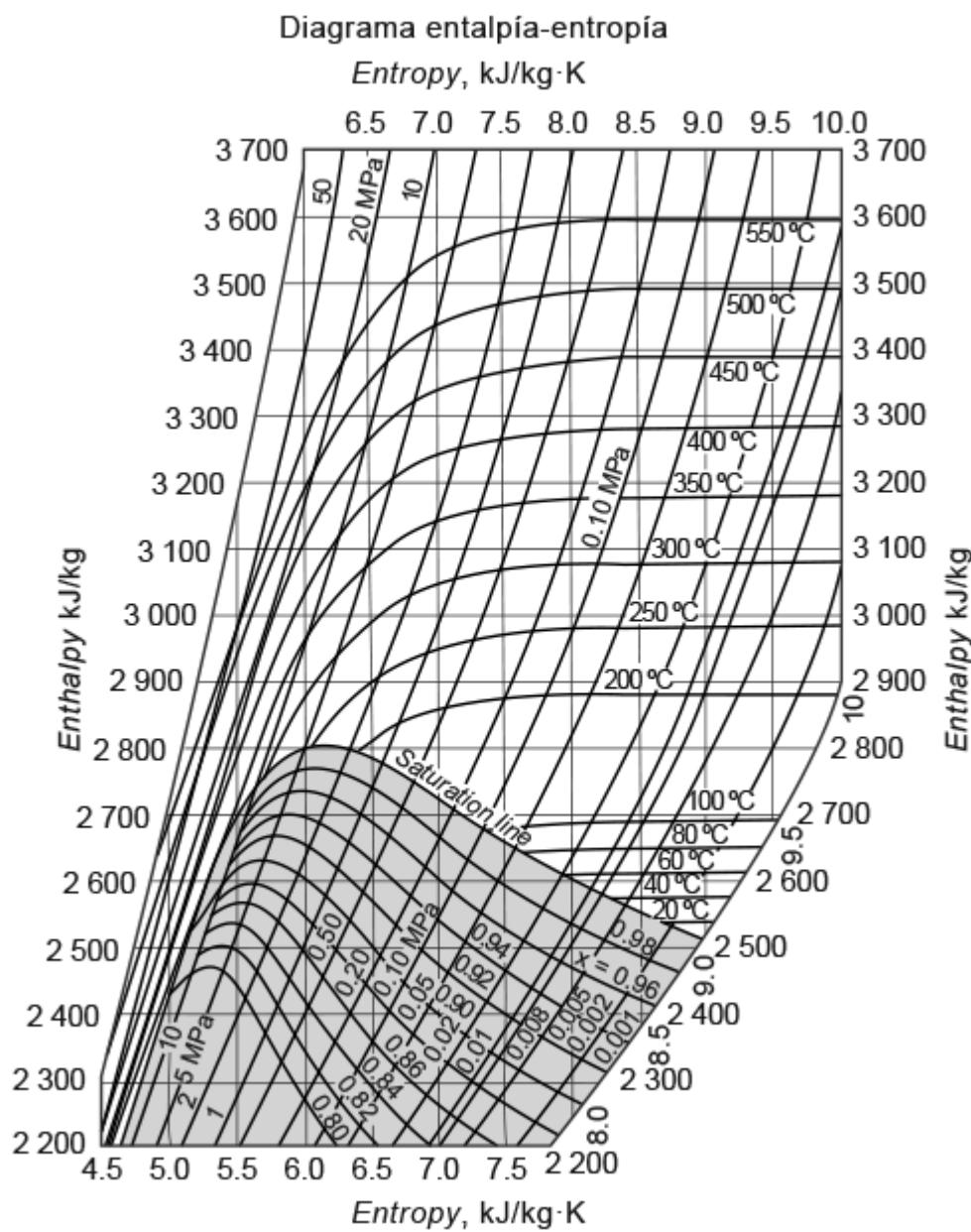


Bajo 0 °C las propiedades y líneas de desviación en las entalpías son para el hielo

Volumen húmedo, m³/kg aire seco



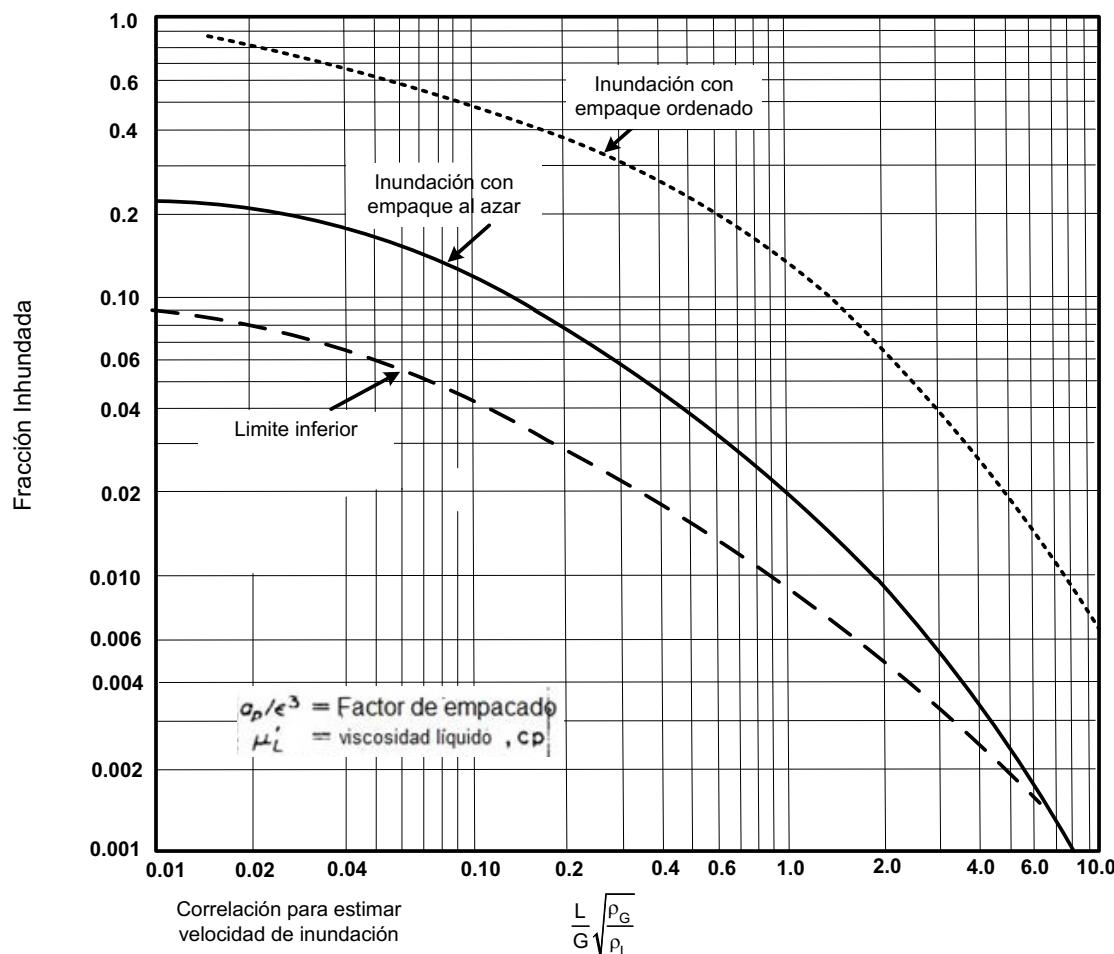
Diagrama de Mollier



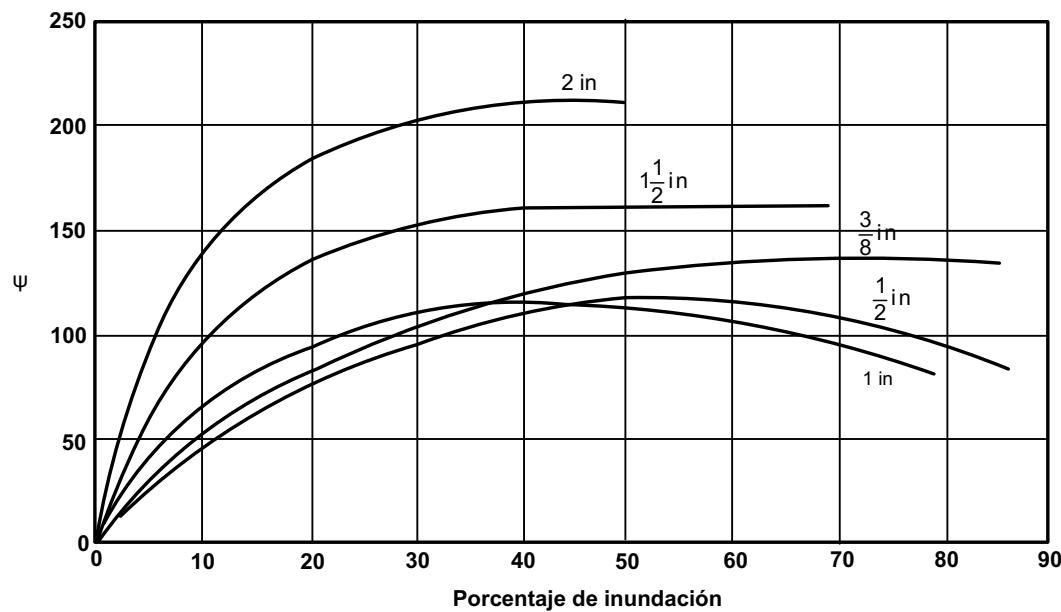


Gráfica de Eckert para torres empacadas

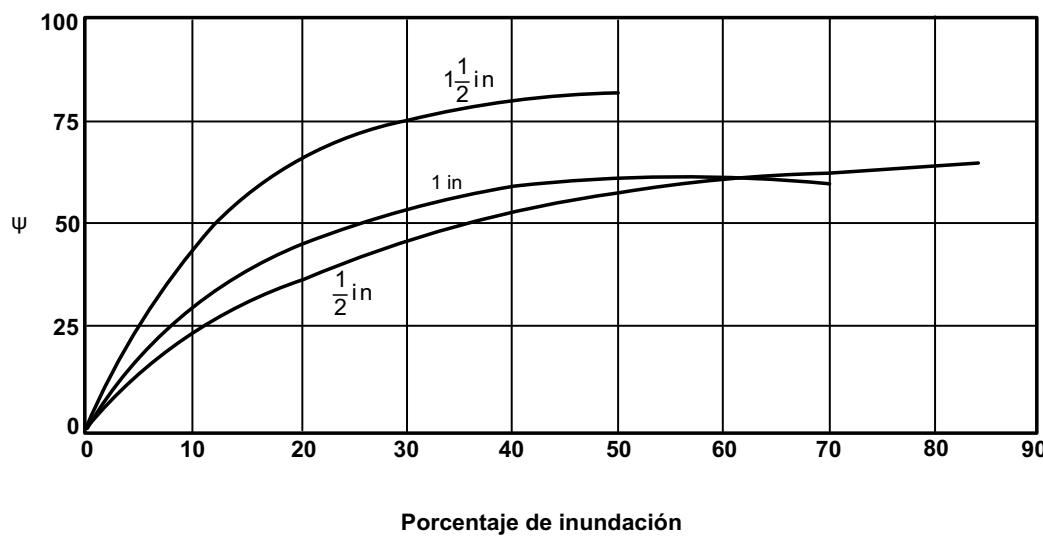
$$\frac{V^2 \left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \rho_G (\mu'_L)^{0.2}}{g \rho_L} = \frac{G^2 \left(\frac{a_p}{\epsilon^3} \right) \rho_G (\mu'_L)^{0.2}}{g \rho_G \rho_L}$$



ψ Parámetro usado para calcular HTUG para diferentes tamaños de anillos Rasching en torres empacadas

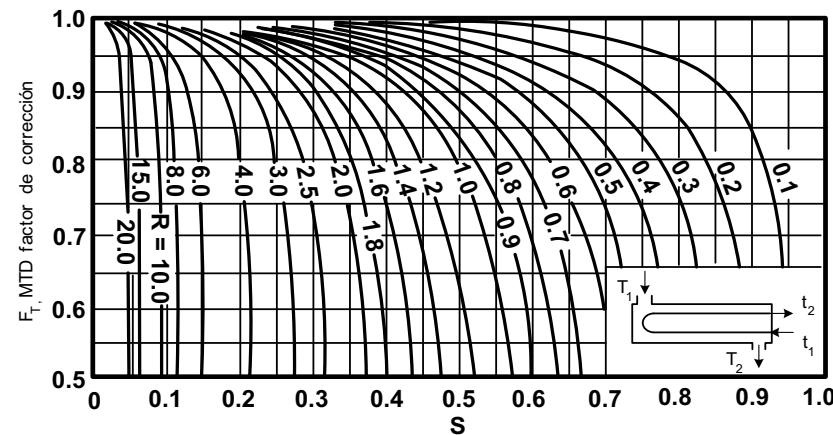


ψ Parámetro usado para calcular HTUG para diferentes tamaños de sillas Berl en torres empacadas

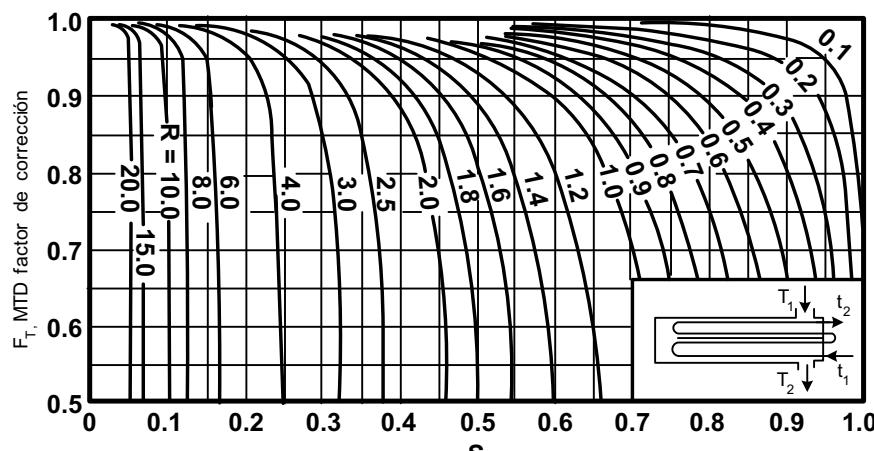




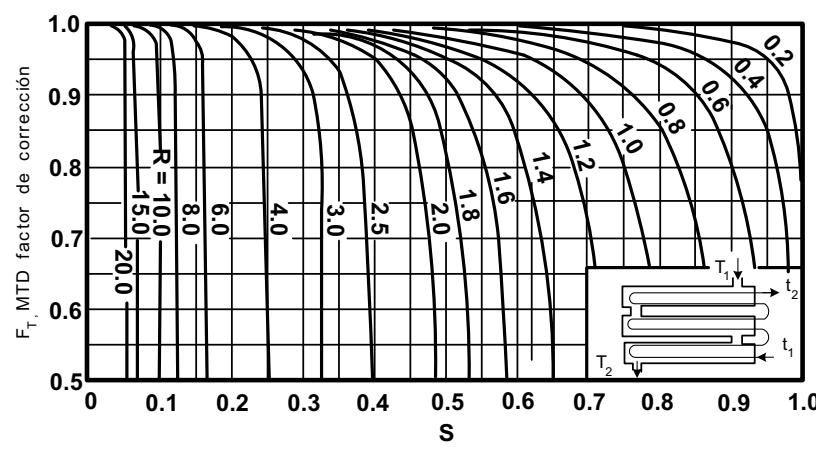
Gráficas-Factores de Corrección para cambiadores de calor



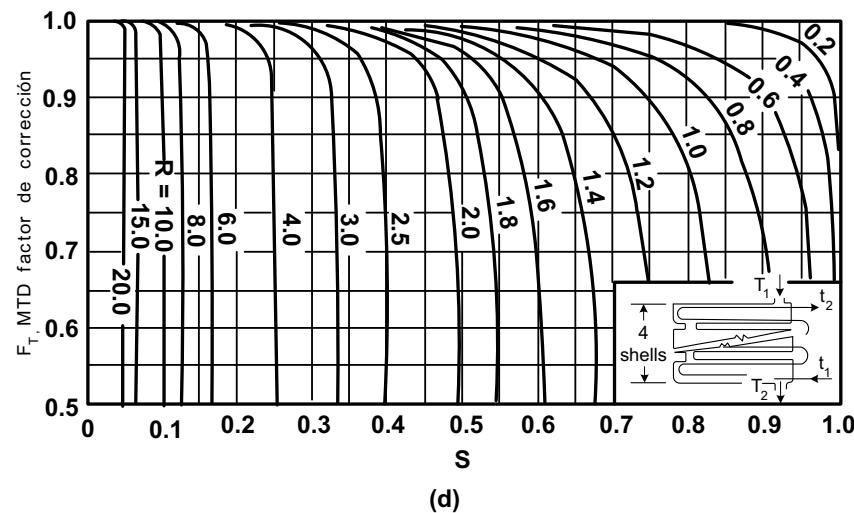
(a)



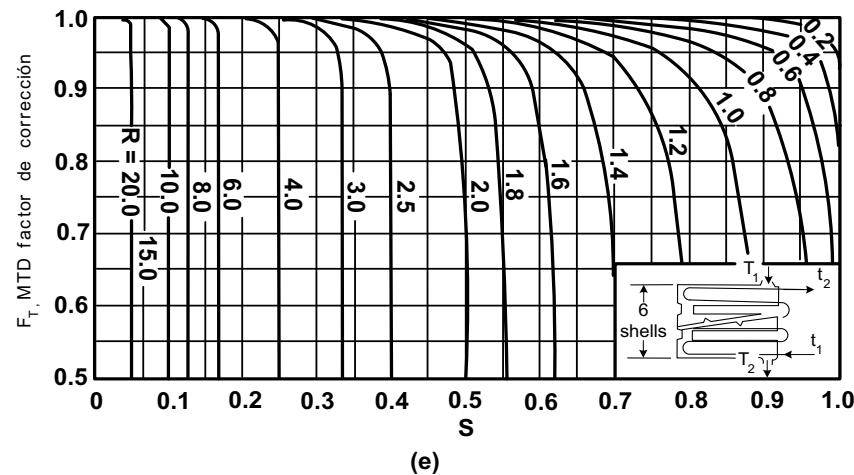
(b)



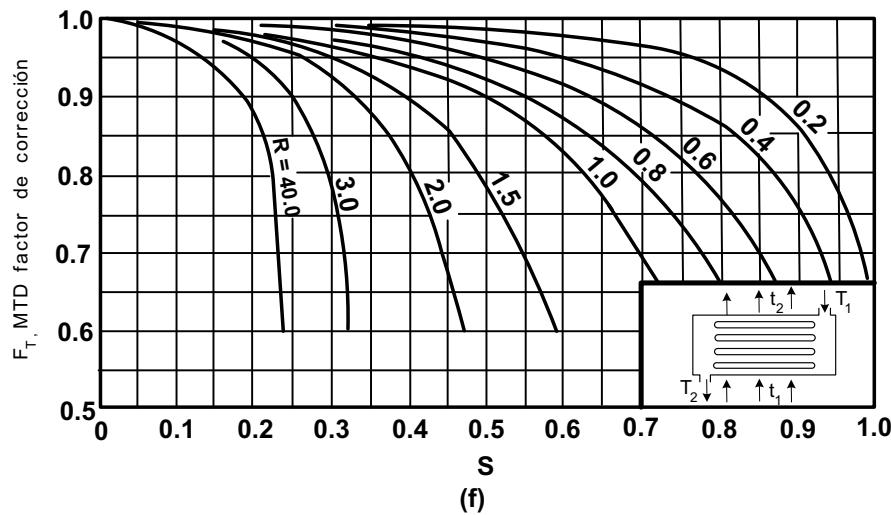
(c)



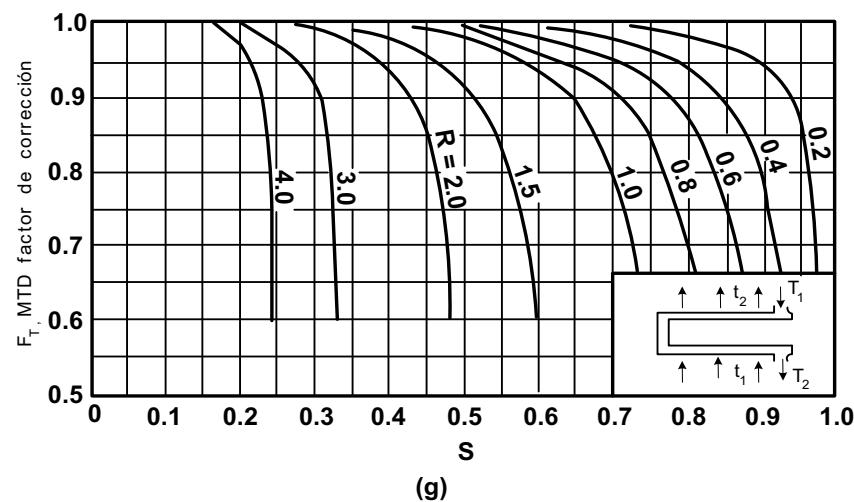
(d)



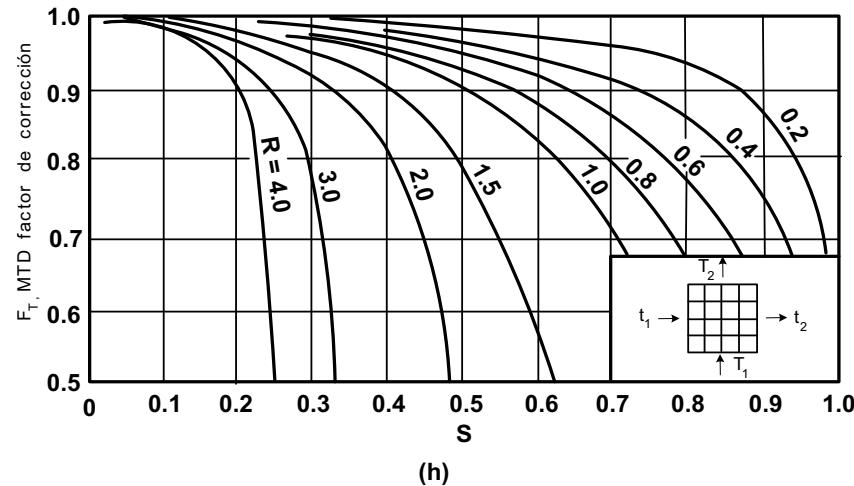
(e)



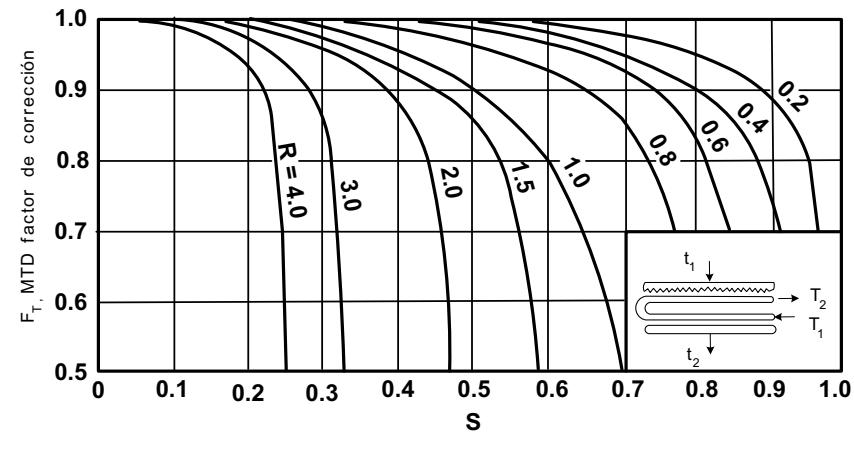
(f)



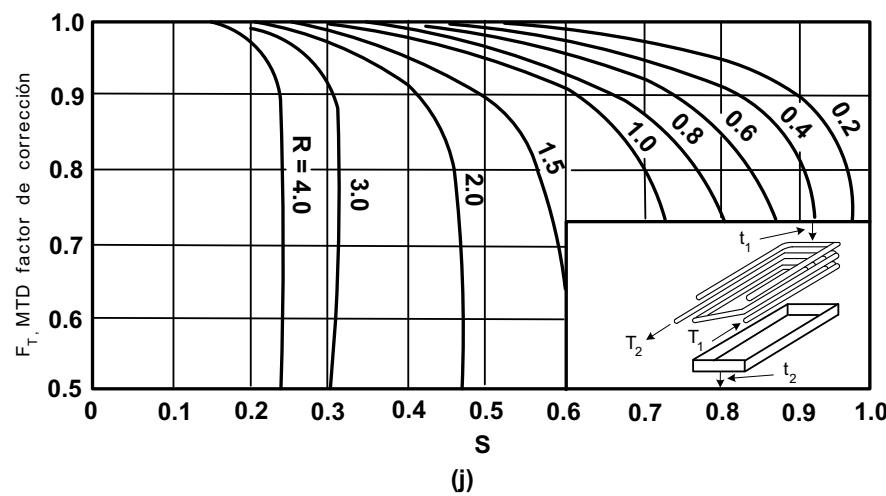
(g)



(h)



(i)

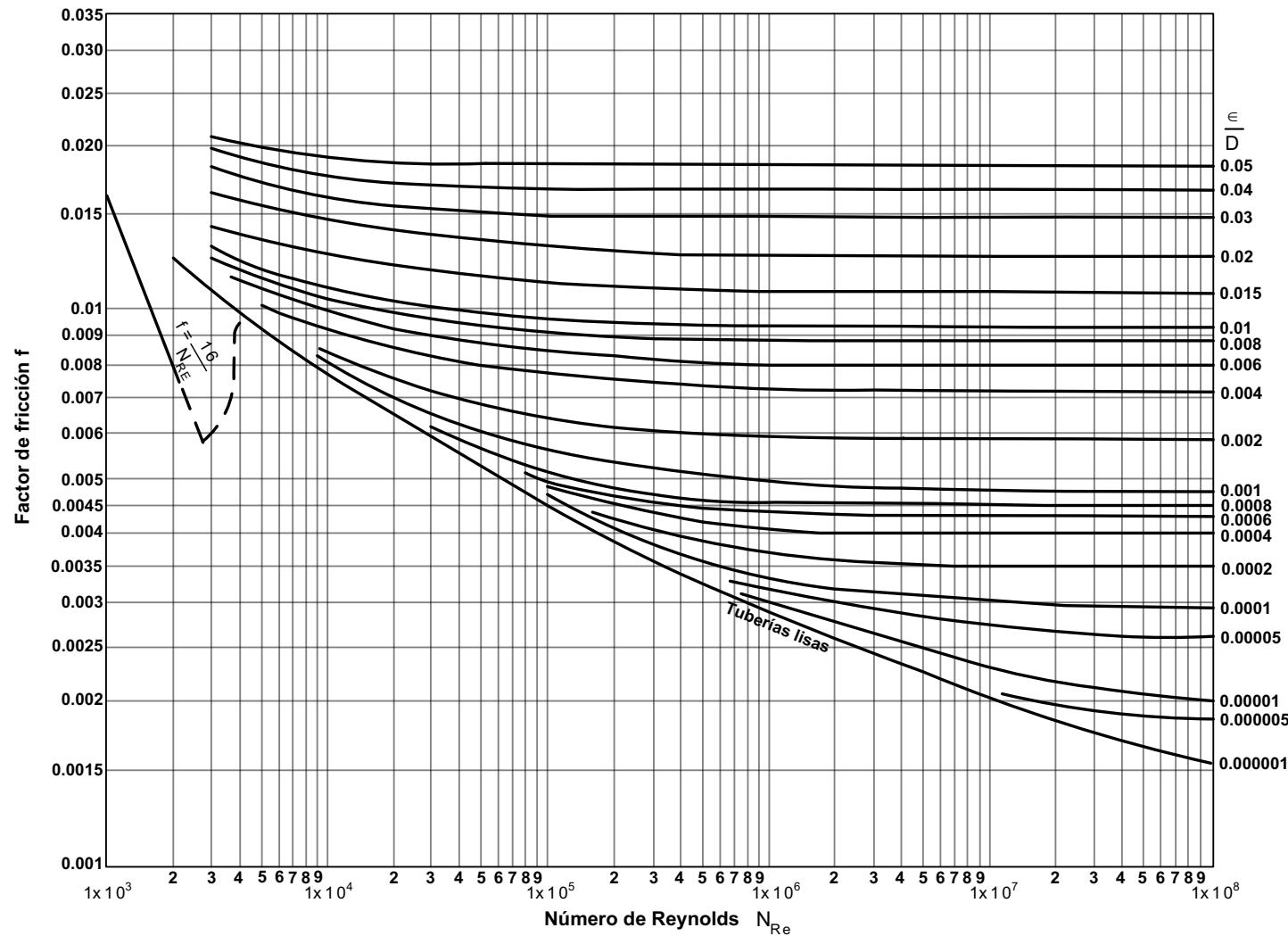


(j)

Fuente: Manual Factor de Corrección de LMTD Ingeniero Químico, Perry



Diagrama de Moody



Fuente: L.F. Moody. (1944) Trans. ASME, Vol. 66



Constantes de la ecuación de Antoine

$$\log_{10} P^\circ (\text{mmHg}) = A - \frac{B}{T (\text{°C}) + C}$$

| Compuesto | Fórmula | Intervalo (°C) | A | B | C |
|----------------------|--|----------------|---------|-----------|---------|
| Acetaldehído | C ₂ H ₄ O | -0.2 a 34.4 | 8.00552 | 1 600.017 | 291.809 |
| Acetato de etilo | C ₄ H ₈ O ₂ | 15.6 a 75.8 | 7.10179 | 1 244.951 | 217.881 |
| Acetato de etilo* | C ₄ H ₈ O ₂ | -20 a 150 | 7.09808 | 1 238.710 | 217.0 |
| Acetato de metilo | C ₃ H ₆ O ₂ | 1.8 a 55.8 | 7.06524 | 1 157.630 | 219.726 |
| Acetato de vinilo | C ₄ H ₆ O ₂ | 21.8 a 72.0 | 7.21010 | 1 296.130 | 226.655 |
| Acetona | C ₃ H ₆ O | -12.9 a 55.3 | 7.11714 | 1 210.595 | 229.664 |
| Ácido acético | C ₂ H ₄ O ₂ | 29.8 a 126.5 | 7.38782 | 1 533.313 | 222.309 |
| Ácido acético * | C ₂ H ₄ O ₂ | 0 a 36 | 7.18807 | 1 416.7 | 225 |
| Ácido acrílico | C ₃ H ₄ O ₂ | 20.0 a 70.0 | 5.65204 | 648.629 | 154.683 |
| Ácido butírico | C ₄ H ₈ O ₂ | 20.0 a 150.0 | 8.71019 | 2 433.014 | 255.189 |
| Ácido fórmico | CH ₂ O ₂ | 37.4 a 100.7 | 7.58178 | 1 699.173 | 260.714 |
| Ácido propiónico | C ₃ H ₆ O ₂ | 72.4 a 128.3 | 7.71423 | 1 733.418 | 217.724 |
| Agua* | H ₂ O | 0 a 60 | 8.10765 | 1 750.286 | 235.000 |
| Agua* | H ₂ O | 60 a 150 | 7.96681 | 1 668.210 | 228.000 |
| Amoniaco* | NH ₃ | -83 a 60 | 7.55466 | 1 002.711 | 247.885 |
| Anhídrido acético | C ₄ H ₆ O ₃ | 62.8 a 139.4 | 7.14948 | 1 444.718 | 199.817 |
| Anilina | C ₆ H ₅ N | 102.6 a 185.2 | 7.32010 | 1 731.515 | 206.049 |
| Benceno | C ₆ H ₆ | 14.5 a 80.9 | 6.89272 | 1 203.531 | 219.888 |
| Bromuro de metilo | CH ₃ Br | -70.0 a 3.6 | 7.09084 | 1 046.066 | 244.914 |
| <i>i</i> -Butano | <i>i</i> -C ₄ H ₁₀ | -85.1 a -11.6 | 6.78866 | 899.617 | 241.942 |
| <i>n</i> -Butano | <i>n</i> -C ₄ H ₁₀ | -78.0 a -0.3 | 6.82485 | 943.453 | 239.711 |
| 1-Butanol | C ₄ H ₁₀ O | 89.2 a 125.7 | 7.36366 | 1 305.198 | 173.427 |
| 2-Butanol | C ₄ H ₁₀ O | 72.4 a 107.1 | 7.20131 | 1 157.000 | 168.279 |
| 1-Buteno | C ₄ H ₈ | -77.5 a -3.7 | 6.53101 | 810.261 | 228.066 |
| Cianuro de hidrógeno | HCN | -16.4 a 46.2 | 7.52823 | 1 329.49 | 260.418 |
| Ciclohexano | C ₆ H ₁₂ | 19.9 a 81.6 | 6.84941 | 1 206.001 | 223.148 |
| Ciclohexanol | C ₆ H ₁₂ O | 93.7 a 160.7 | 6.25530 | 912.866 | 109.126 |
| Clorobenceno | C ₆ H ₅ Cl | 62.0 a 131.7 | 6.97808 | 1 431.053 | 217.550 |
| Clorobenceno* | C ₆ H ₅ Cl | 0 a 42 | 7.10690 | 1 500.0 | 224.0 |
| Clorobenceno* | C ₆ H ₅ Cl | 42 a 30 | 6.94504 | 1 413.12 | 216.0 |
| Cloroformo | CHCl ₃ | -10.4 a 60.3 | 6.95465 | 1 170.966 | 226.232 |
| Cloroformo* | CHCl ₃ | -30 a 150 | 6.90328 | 1 163.03 | 227.4 |



| Compuesto | Fórmula | Intervalo (°C) | A | B | C |
|------------------------------|---|----------------|---------|-----------|---------|
| Cloruro de etilo | $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ | -55.9 a 12.5 | 6.98647 | 1 030.007 | 238.612 |
| Cloruro de metilo | CH_3Cl | -75.0 a 5.0 | 7.09349 | 948.582 | 249.336 |
| <i>n</i> -Decano | <i>n</i> - $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ | 94.5 a 175.1 | 6.95707 | 1 503.568 | 194.738 |
| 1-Deceno | $\text{C}_{10}\text{H}_{20}$ | 86.8 a 171.6 | 6.95433 | 1 497.527 | 197.056 |
| 1,1-Dicloroetano | $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_{12}$ | -38.8 a 17.6 | 6.97702 | 1 174.022 | 229.060 |
| 1,2-Dicloroetano | $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}$ | -30.8 a 99.4 | 7.02530 | 1 271.254 | 222.927 |
| Diclorometano | CH_2Cl_2 | -40.0 a 40 | 7.40916 | 1 325.938 | 252.616 |
| Dietilcetona | $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$ | 56.5 a 111.3 | 7.02529 | 1 310.281 | 214.192 |
| Dietilenglicol | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$ | 130.0 a 243.0 | 7.63666 | 1 939.359 | 162.714 |
| Dimetilamina | $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$ | -71.8 a 6.9 | 7.08212 | 960.242 | 221.667 |
| <i>N,N</i> -Dimetilformamida | $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ | 30.0 a 90.0 | 6.92796 | 1 400.869 | 196.434 |
| 1,4-Dioxano | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ | 20.0 a 105.0 | 7.43155 | 1 554.679 | 240.337 |
| Disulfuro de carbono | CS_2 | 3.6 a 79.9 | 6.94279 | 1 169.110 | 241.593 |
| Estireno | C_8H_8 | 29.9 a 144.8 | 7.06623 | 1 507.434 | 214.985 |
| Etanol | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ | 19.6 a 93.4 | 8.11220 | 1 592.864 | 226.184 |
| Etanolamina | $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ | 65.4 a 170.9 | 7.45680 | 1 577.670 | 173.368 |
| Éter dietílico | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ | -60.8 a 19.9 | 6.92032 | 1 064.066 | 228.799 |
| Éter dimetílico | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ | -78.2 a -24.9 | 6.97603 | 889.264 | 241.957 |
| Etilbenceno | C_8H_{10} | 56.5 a 137.1 | 6.95650 | 1 423.543 | 213.091 |
| 1,2-Etilendiamina | $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}$ | 26.5 a 117.4 | 7.16871 | 1 336.235 | 194.366 |
| Etilenglicol | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ | 50.0 a 200.0 | 8.09083 | 2 088.936 | 203.454 |
| Fenol | $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ | 107.2 a 181.8 | 7.13301 | 1 516.790 | 174.954 |
| Formaldehído | HCHO | -109.4 a -22.3 | 7.19578 | 970.595 | 244.124 |
| Glicerol | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ | 183.3 a 260.4 | 6.16501 | 1 036.056 | 28.097 |
| <i>i</i> -Heptano | <i>i</i> - C_7H_{16} | 18.5 a 90.9 | 6.87689 | 1 238.122 | 219.783 |
| <i>n</i> -Heptano | <i>n</i> - C_7H_{16} | 25.9 a 99.3 | 6.90253 | 1 267.828 | 216.823 |
| 1-Heptano | C_7H_{14} | 21.6 a 94.5 | 6.91381 | 1 265.120 | 220.051 |
| <i>i</i> -Hexano | <i>i</i> - C_6H_{14} | 12.8 a 61.1 | 6.86839 | 1 151.401 | 228.477 |
| <i>n</i> -Hexano | <i>n</i> - C_6H_{14} | 13.0 a 69.5 | 6.88555 | 1 175.817 | 224.867 |
| 1-Hexeno | C_6H_{12} | 15.9 a 64.3 | 6.86880 | 1 154.646 | 226.046 |
| Metacrilato de metilo | $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ | 39.2 a 89.2 | 8.40919 | 2 050.467 | 274.369 |
| Metanol | CH_3OH | 14.9 a 83.7 | 8.08097 | 1 582.271 | 239.726 |



| Compuesto | Fórmula | Intervalo (°C) | A | B | C |
|-------------------------|---|----------------|---------|-----------|---------|
| Metanol* | CH ₃ OH | -20 a 140 | 7.87863 | 1 473.11 | 230.0 |
| Metilamina | CH ₅ N | -83.1 a -6.2 | 7.33690 | 1 011.532 | 233.286 |
| Metilciclohexano | C ₇ H ₁₄ | 25.6 a 101.8 | 6.82827 | 1 273.673 | 221.723 |
| Metiletilcetona | C ₄ H ₈ O | 42.8 a 88.4 | 7.06356 | 1 261.339 | 221.969 |
| Metilisobutilcetona | C ₆ H ₁₂ O | 21.7 a 116.2 | 6.67272 | 1 168.408 | 191.944 |
| Naftaleno | C ₁₀ H ₈ | 80.3 a 179.5 | 7.03358 | 1 756.328 | 204.842 |
| Nitrobenceno | C ₆ H ₅ NO ₂ | 134.1 a 210.6 | 7.11562 | 1 746.586 | 201.783 |
| Nitrometano | CH ₃ NO ₂ | 55.7 a 136.4 | 7.28166 | 1 446.937 | 227.600 |
| <i>n</i> -Nonano | <i>n</i> -C ₉ H ₂₀ | 70.3 a 151.8 | 6.93764 | 1 430.459 | 201.808 |
| <i>i</i> -Noneno | C ₉ H ₁₈ | 66.6 a 147.9 | 6.95777 | 1 437.862 | 205.814 |
| <i>i</i> -Octano | <i>i</i> -C ₈ H ₁₈ | 41.7 a 118.5 | 6.88814 | 1 319.529 | 211.625 |
| <i>n</i> -Octano | <i>n</i> -C ₈ H ₁₈ | 52.9 a 126.6 | 6.91874 | 1 351.756 | 209.100 |
| <i>i</i> -Octeno | C ₈ H ₁₆ | 44.9 a 122.2 | 6.93637 | 1 355.779 | 213.022 |
| Óxido de etileno | C ₂ H ₄ O | 0.3 a 31.8 | 8.69016 | 2 005.779 | 334.765 |
| Óxido de propileno | C ₃ H ₆ O | -24.2 a 34.8 | 7.01443 | 1 086.369 | 228.594 |
| <i>i</i> -Pentano | <i>i</i> -C ₅ H ₁₂ | 16.3 a 28.6 | 6.73457 | 992.019 | 229.564 |
| <i>n</i> -Pentano | <i>n</i> -C ₅ H ₁₂ | 13.3 a 36.8 | 6.84471 | 1 060.793 | 231.541 |
| 1-Pentanol | C ₅ H ₁₂ O | 74.7 a 156.0 | 7.18246 | 1 287.625 | 161.330 |
| 1-Penteno | C ₅ H ₁₀ | 12.8 a 30.7 | 6.84268 | 1 043.206 | 233.344 |
| Piridina | C ₅ H ₅ N | 67.3 a 152.9 | 7.04115 | 1 373.799 | 214.979 |
| 1-Propanol | C ₃ H ₈ O | 60.2 a 104.6 | 7.74416 | 1 437.686 | 198.463 |
| 2-Propanol | C ₃ H ₈ O | 52.3 a 89.3 | 7.74021 | 1 359.517 | 197.527 |
| Tetracloruro de carbono | CCl ₄ | 14.1 a 76.0 | 6.87926 | 1 212.021 | 226.409 |
| Tolueno | C ₇ H ₈ | 35.3 a 111.5 | 6.95805 | 1 346.773 | 219.693 |
| 1,1,1-Tricloroetano | C ₂ H ₃ Cl ₃ | -5.4 a 16.9 | 8.64344 | 2 136.621 | 302.769 |
| 1,1,2-Tricloroetano | C ₂ H ₃ Cl ₃ | 50.0 a 113.7 | 6.95185 | 1 314.410 | 209.197 |
| Tricloroetileno | C ₂ HCl ₃ | 17.8 a 86.5 | 6.51827 | 1 018.603 | 192.731 |
| <i>m</i> -Xileno | <i>m</i> -C ₈ H ₁₀ | 59.2 a 140.0 | 7.00646 | 1 460.183 | 214.827 |
| <i>o</i> -Xileno | <i>o</i> -C ₈ H ₁₀ | 63.5 a 145.4 | 7.00154 | 1 476.393 | 213.872 |
| <i>p</i> -Xileno | <i>p</i> -C ₈ H ₁₀ | 58.3 a 139.3 | 6.98820 | 1 451.792 | 215.111 |

Las constantes con asterisco (*) se tomaron de Lange's Handbook of Chemistry, 9^a. Edición, Handbook Publisher, Inc., Sandusky, OH
Fuente: http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0072849606/315014/physical_properties_table.pdf



Constantes de propiedades físicas

M = masa molar, g/mol

T_b = temperatura normal de ebullición, °R

T_c = temperatura crítica, °R

P_c = presión crítica, psia

Z_c = factor de compresibilidad crítico

ω = factor acéntrico de Pitzer

δ = parámetro de solubilidad de Hildebrand a 25°C (cal/cm³)^{1/2}

V_L = volumen molar del líquido a la temperatura indicada (°C), cm³/mol

| No. | Fórmula empírica | Nombre | M | T _b | T _c | P _c | Z _c | ω | δ | V _L |
|-----|---------------------------------|--------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|----------------|
| 1 | H ₂ O | Agua | 18.015 | 671.7 | 1165.1 | 3206.7 | 0.232 | 0.3477 | 18.0 | 18.1 (20) |
| 2 | CH ₄ | Metano | 16.043 | 201.0 | 343.9 | 673.1 | 0.289 | 0.0 | 5.680 | 52.0 (25) |
| 3 | CH ₃ O | Metanol | 32.042 | 607.8 | 923.7 | 1153.6 | 0.228 | 0.5556 | 14.510 | 40.5 (20) |
| 4 | C ₂ H ₂ | Acetileno | 26.038 | 339.0 | 555.0 | 890.3 | 0.267 | 0.1917 | 5.329 | 42.3 (-84) |
| 5 | C ₂ H ₄ | Etileno | 28.054 | 305.0 | 509.5 | 742.2 | 0.284 | 0.0872 | 5.801 | 61.0 (25) |
| 6 | C ₂ H ₆ | Etano | 30.070 | 332.2 | 550.0 | 709.8 | 0.282 | 0.1064 | 6.050 | 68.0 (25) |
| 7 | C ₂ H ₅ O | Etanol | 46.069 | 632.1 | 929.3 | 925.3 | 0.250 | 0.6341 | 12.915 | 58.4 (20) |
| 8 | C ₃ H ₆ | Propileno | 42.081 | 405.8 | 657.2 | 667.0 | 0.279 | 0.1421 | 6.208 | 79.02 (25) |
| 9 | C ₃ H ₆ O | Acetona | 58.080 | 592.1 | 917.0 | 693.7 | 0.247 | 0.3035 | 9.566 | 73.5 (20) |
| 10 | C ₃ H ₈ | Propano | 44.097 | 416.0 | 665.9 | 617.4 | 0.278 | 0.1538 | 6.400 | 84.0 (25) |
| 11 | C ₃ H ₈ O | n-Propanol | 60.096 | 666.7 | 966.4 | 737.1 | 0.250 | 0.6111 | 12.050 | 74.7 (20) |
| 12 | C ₄ H ₈ | 1-Buteno | 56.108 | 480.2 | 755.3 | 583.0 | 0.274 | 0.2085 | 6.766 | 95.6 (25) |
| 13 | C ₄ H ₁₀ | n-Butano | 58.124 | 490.8 | 765.3 | 550.7 | 0.274 | 0.1954 | 6.634 | 101.4 (25) |
| 14 | C ₅ H ₁₀ | Ciclopentano | 70.135 | 580.4 | 921.2 | 655.0 | 0.274 | 0.1966 | 8.010 | 94.7 (25) |
| 15 | C ₅ H ₁₀ | 1-Penteno | 70.135 | 545.6 | 853.0 | 586.0 | 0.273 | 0.2198 | 7.055 | 110.4 (25) |
| 16 | C ₅ H ₁₂ | n-Pentano | 72.151 | 556.6 | 845.6 | 489.5 | 0.269 | 0.2387 | 7.020 | 116.1 (25) |
| 17 | C ₆ H ₆ | Benceno | 78.114 | 635.9 | 1012.7 | 714.2 | 0.272 | 0.2116 | 9.158 | 89.4 (25) |
| 18 | C ₆ H ₁₂ | Ciclohexano | 84.162 | 637.0 | 995.3 | 591.5 | 0.272 | 0.2149 | 8.193 | 108.7 (25) |
| 19 | C ₆ H ₁₄ | n-Hexano | 86.178 | 615.4 | 914.2 | 440.0 | 0.266 | 0.2972 | 7.266 | 131.6 (25) |
| 20 | C ₇ H ₈ | Tolueno | 92.141 | 790.8 | 1069.1 | 587.8 | 0.263 | 0.2415 | 8.914 | 106.8 (25) |
| 21 | C ₇ H ₁₆ | n-Heptano | 100.205 | 668.9 | 972.3 | 396.9 | 0.261 | 0.3403 | 7.430 | 147.5 (25) |
| 22 | C ₈ H ₈ | Estireno | 104.152 | 752.9 | 1146.4 | 559.0 | 0.261 | 0.2885 | 9.211 | 115.0 (20) |
| 23 | C ₈ H ₁₀ | Etilbenceno | 106.168 | 736.8 | 1115.5 | 540.0 | 0.265 | 0.2981 | 8.783 | 123.1 (25) |
| 24 | C ₈ H ₁₀ | m-Xileno | 106.168 | 742.1 | 1114.6 | 510.0 | 0.264 | 0.3086 | 8.818 | 123.5 (25) |
| 25 | C ₈ H ₁₀ | o-Xileno | 106.168 | 751.6 | 1138.0 | 530.0 | 0.266 | 0.2904 | 8.987 | 121.2 (25) |
| 26 | C ₈ H ₁₀ | p-Xileno | 106.168 | 740.7 | 1112.8 | 500.0 | 0.265 | 0.3304 | 8.769 | 124.0 (25) |
| 27 | C ₈ H ₁₈ | n-Octano | 114.232 | 717.9 | 1024.9 | 362.1 | 0.258 | 0.3992 | 7.551 | 163.5 (25) |

*Fuente: Henley, E.J., Seader, J.D. (1988) Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. Reverté.



Tablas de propiedades termodinámicas de algunos gases inorgánicos

Nitrógeno diatómico (N_2)

($\Delta h_f^\circ = 0 \text{ kJ/kmol}$; T, K; \bar{h} y \bar{u} , kJ/kmol; \bar{s}° , kJ/(kmol · K); el estado estándar es 1 atm)

| T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° | T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° |
|-----|-----------|-----------|-----------------|-----|-----------|-----------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 17.563 | 12.574 | 212.066 |
| 220 | 6.391 | 4.562 | 182.639 | 610 | 17.864 | 12.792 | 212.564 |
| 230 | 6.683 | 4.770 | 683.938 | 620 | 18.166 | 13.011 | 213.055 |
| 240 | 6.975 | 4.979 | 185.180 | 630 | 18.468 | 13.230 | 213.541 |
| 250 | 7.266 | 5.188 | 186.370 | 640 | 18.772 | 13.450 | 214.018 |
| 260 | 7.558 | 5.396 | 187.514 | 650 | 19.075 | 13.671 | 214.489 |
| 270 | 7.849 | 5.604 | 188.614 | 660 | 19.380 | 13.892 | 214.954 |
| 280 | 8.141 | 5.813 | 189.673 | 670 | 19.685 | 14.114 | 215.413 |
| 290 | 8.432 | 6.021 | 190.695 | 680 | 19.991 | 14.337 | 215.866 |
| 298 | 8.669 | 6.190 | 191.502 | 690 | 20.297 | 14.560 | 216.314 |
| 300 | 8.723 | 6.229 | 191.682 | 700 | 20.604 | 14.784 | 216.756 |
| 310 | 9.014 | 6.437 | 192.638 | 710 | 20.912 | 15.008 | 217.192 |
| 320 | 9.306 | 6.645 | 193.562 | 720 | 21.220 | 15.234 | 217.624 |
| 330 | 9.597 | 6.853 | 194.459 | 730 | 21.529 | 15.460 | 218.059 |
| 340 | 9.888 | 7.061 | 195.328 | 740 | 21.839 | 15.686 | 218.472 |
| 350 | 10.180 | 7.270 | 196.173 | 750 | 22.149 | 15.913 | 218.889 |
| 360 | 10.471 | 7.478 | 196.995 | 760 | 22.460 | 16.141 | 219.301 |
| 370 | 10.763 | 7.687 | 197.794 | 770 | 22.772 | 16.370 | 219.709 |
| 380 | 11.055 | 7.895 | 198.572 | 780 | 23.085 | 16.599 | 220.113 |
| 390 | 11.347 | 8.104 | 199.331 | 790 | 23.398 | 16.830 | 220.512 |
| 400 | 11.640 | 8.314 | 200.071 | 800 | 23.714 | 17.061 | 220.907 |
| 410 | 11.932 | 8.523 | 200.794 | 810 | 24.027 | 17.292 | 221.298 |
| 420 | 12.225 | 8.733 | 201.499 | 820 | 23.342 | 17.524 | 221.684 |
| 430 | 12.518 | 8.943 | 202.189 | 830 | 24.658 | 17.757 | 222.067 |
| 440 | 12.811 | 9.153 | 202.863 | 840 | 24.974 | 17.990 | 222.447 |
| 450 | 13.105 | 9.363 | 203.523 | 850 | 25.292 | 18.224 | 222.822 |
| 460 | 13.399 | 9.574 | 204.170 | 860 | 25.610 | 18.459 | 223.194 |
| 470 | 13.693 | 9.786 | 204.803 | 870 | 25.928 | 18.695 | 223.562 |
| 480 | 13.988 | 9.997 | 205.424 | 880 | 26.248 | 18.931 | 223.927 |
| 490 | 14.285 | 10.210 | 206.033 | 890 | 26.568 | 19.168 | 224.288 |
| 500 | 14.581 | 10.423 | 206.630 | 900 | 26.890 | 19.407 | 224.647 |
| 510 | 14.876 | 10.635 | 207.216 | 910 | 27.210 | 19.644 | 225.002 |
| 520 | 15.172 | 10.848 | 207.792 | 920 | 27.532 | 19.883 | 225.353 |
| 530 | 15.469 | 11.062 | 208.358 | 930 | 27.854 | 20.122 | 225.701 |
| 540 | 15.766 | 11.277 | 208.914 | 940 | 28.178 | 20.362 | 226.047 |
| 550 | 16.064 | 11.492 | 209.461 | 950 | 28.501 | 20.603 | 226.389 |
| 560 | 16.363 | 11.707 | 209.999 | 960 | 28.826 | 20.844 | 226.728 |
| 570 | 16.662 | 11.923 | 210.528 | 970 | 29.151 | 21.086 | 227.064 |
| 580 | 16.962 | 12.139 | 211.049 | 980 | 29.476 | 21.328 | 227.398 |
| 590 | 17.262 | 12.356 | 211.562 | 990 | 29.803 | 21.571 | 227.728 |

Fuente: JANAF (1971) Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37



Oxígeno diatómico (O_2)

($\Delta h_f^\circ = 0 \text{ kJ/kmol}$; T, K ; \bar{h} y \bar{u} , kJ/kmol ; \bar{s}° , $\text{kJ/(kmol} \cdot \text{K)}$; el estado estándar es 1 atm)

| T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° | T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° |
|-----|-----------|-----------|-----------------|-----|-----------|-----------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 17.929 | 12.940 | 226.346 |
| 220 | 6.404 | 4.575 | 196.171 | 610 | 18.250 | 13.178 | 226.877 |
| 230 | 6.694 | 4.782 | 197.461 | 620 | 18.572 | 13.417 | 227.400 |
| 240 | 6.984 | 4.989 | 198.696 | 630 | 18.895 | 13.657 | 227.918 |
| 250 | 7.275 | 5.197 | 199.885 | 640 | 19.219 | 13.898 | 228.429 |
| 260 | 7.566 | 5.405 | 201.027 | 650 | 19.544 | 14.140 | 228.932 |
| 270 | 7.858 | 5.613 | 202.128 | 660 | 19.870 | 14.383 | 229.430 |
| 280 | 8.150 | 5.822 | 203.191 | 670 | 20.197 | 14.626 | 229.920 |
| 290 | 8.443 | 6.032 | 204.218 | 680 | 20.524 | 14.871 | 230.405 |
| 298 | 8.682 | 6.203 | 205.033 | 690 | 20.854 | 15.116 | 230.885 |
| 300 | 8.736 | 6.242 | 205.213 | 700 | 21.184 | 15.364 | 231.358 |
| 310 | 9.030 | 6.453 | 206.177 | 710 | 21.514 | 15.611 | 231.827 |
| 320 | 9.325 | 6.664 | 207.112 | 720 | 21.845 | 15.859 | 232.291 |
| 330 | 9.620 | 6.877 | 208.020 | 730 | 22.177 | 16.107 | 232.748 |
| 340 | 9.916 | 7.090 | 208.904 | 740 | 22.510 | 16.357 | 233.201 |
| 350 | 10.213 | 7.303 | 209.765 | 750 | 22.844 | 16.607 | 233.649 |
| 360 | 10.511 | 7.518 | 210.104 | 760 | 23.178 | 16.859 | 234.091 |
| 370 | 10.809 | 7.733 | 211.423 | 770 | 23.513 | 17.111 | 234.528 |
| 380 | 11.109 | 7.949 | 212.222 | 780 | 23.850 | 17.364 | 234.960 |
| 390 | 11.409 | 8.166 | 213.002 | 790 | 24.186 | 17.618 | 235.387 |
| 400 | 11.711 | 8.384 | 213.765 | 800 | 24.523 | 17.872 | 235.810 |
| 410 | 12.012 | 8.603 | 214.510 | 810 | 24.861 | 18.126 | 236.230 |
| 420 | 12.314 | 8.822 | 215.241 | 820 | 25.199 | 18.382 | 236.644 |
| 430 | 12.118 | 9.043 | 215.955 | 830 | 25.537 | 18.637 | 237.055 |
| 440 | 12.923 | 9.264 | 216.656 | 840 | 25.877 | 18.893 | 237.462 |
| 450 | 13.228 | 9.487 | 217.342 | 850 | 26.218 | 19.150 | 237.864 |
| 460 | 13.535 | 9.710 | 218.016 | 860 | 26.559 | 19.408 | 238.264 |
| 470 | 13.842 | 9.935 | 218.676 | 870 | 26.899 | 19.666 | 238.660 |
| 480 | 14.151 | 10.160 | 219.326 | 880 | 27.242 | 19.925 | 239.051 |
| 490 | 14.460 | 10.386 | 219.963 | 890 | 27.584 | 20.185 | 239.439 |
| 500 | 14.770 | 10.614 | 220.589 | 900 | 27.928 | 20.445 | 239.823 |
| 510 | 15.082 | 10.842 | 221.206 | 910 | 28.272 | 20.706 | 240.203 |
| 520 | 15.395 | 11.071 | 221.812 | 920 | 28.616 | 20.967 | 240.580 |
| 530 | 15.708 | 11.301 | 222.409 | 930 | 28.960 | 21.228 | 240.953 |
| 540 | 16.022 | 11.533 | 222.997 | 940 | 29.306 | 21.491 | 241.323 |
| 550 | 16.338 | 11.765 | 223.576 | 950 | 29.652 | 21.754 | 241.689 |
| 560 | 16.654 | 11.998 | 224.146 | 960 | 29.999 | 22.017 | 242.052 |
| 570 | 16.971 | 12.232 | 224.708 | 970 | 30.345 | 22.280 | 242.411 |
| 580 | 17.290 | 12.467 | 225.262 | 980 | 30.692 | 22.544 | 242.768 |
| 590 | 17.609 | 12.703 | 225.808 | 990 | 31.041 | 22.809 | 243.120 |

Fuente: JANAF (1971) Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37



Monóxido de carbono (CO)

($\Delta h_f^\circ = 0 \text{ kJ/kmol}$; T, K; \bar{h} y \bar{u} , kJ/kmol; \bar{s}° , kJ/(kmol · K); el estado estándar es 1 atm)

| T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° | T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° |
|-----|-----------|-----------|-----------------|-----|-----------|-----------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 17.611 | 12.622 | 218.204 |
| 220 | 6.391 | 4.562 | 188.683 | 610 | 17.915 | 12.843 | 218.708 |
| 230 | 6.683 | 4.771 | 189.980 | 620 | 18.221 | 13.066 | 219.205 |
| 240 | 6.975 | 4.979 | 191.221 | 630 | 18.527 | 13.289 | 219.695 |
| 250 | 7.266 | 5.188 | 192.411 | 640 | 18.833 | 13.512 | 220.179 |
| 260 | 7.558 | 5.396 | 193.554 | 650 | 19.141 | 13.736 | 220.656 |
| 270 | 7.849 | 5.604 | 194.654 | 660 | 19.449 | 13.962 | 221.127 |
| 280 | 8.140 | 5.812 | 195.173 | 670 | 19.758 | 14.187 | 221.592 |
| 290 | 8.432 | 6.020 | 196.735 | 680 | 20.068 | 14.414 | 222.052 |
| 298 | 8.669 | 6.190 | 197.543 | 690 | 20.378 | 14.641 | 222.505 |
| 300 | 8.723 | 6.229 | 197.723 | 700 | 20.690 | 14.870 | 222.953 |
| 310 | 9.014 | 6.437 | 198.678 | 710 | 21.002 | 15.099 | 223.396 |
| 320 | 9.306 | 6.645 | 199.603 | 720 | 21.315 | 15.328 | 223.833 |
| 330 | 9.597 | 6.854 | 200.500 | 730 | 21.628 | 15.558 | 224.265 |
| 340 | 9.889 | 7.062 | 201.371 | 740 | 21.943 | 15.789 | 224.692 |
| 350 | 10.181 | 7.271 | 202.217 | 750 | 22.158 | 16.022 | 225.115 |
| 360 | 10.473 | 7.480 | 203.040 | 760 | 22.573 | 16.255 | 225.533 |
| 370 | 10.765 | 7.689 | 203.842 | 770 | 22.890 | 16.488 | 225.947 |
| 380 | 11.058 | 7.899 | 204.622 | 780 | 23.208 | 16.723 | 226.357 |
| 390 | 11.351 | 8.108 | 205.383 | 790 | 23.526 | 16.957 | 226.762 |
| 400 | 11.644 | 8.319 | 206.125 | 800 | 23.844 | 17.193 | 227.162 |
| 410 | 11.938 | 8.529 | 206.850 | 810 | 24.164 | 17.429 | 227.559 |
| 420 | 12.232 | 8.740 | 207.549 | 820 | 24.483 | 17.665 | 227.952 |
| 430 | 12.526 | 8.951 | 208.252 | 830 | 24.803 | 17.902 | 228.339 |
| 440 | 12.821 | 9.163 | 208.929 | 840 | 25.124 | 18.140 | 228.724 |
| 450 | 13.116 | 9.375 | 209.593 | 850 | 25.446 | 18.379 | 229.106 |
| 460 | 13.412 | 9.587 | 210.243 | 860 | 25.768 | 18.617 | 229.482 |
| 470 | 13.708 | 9.800 | 210.880 | 870 | 26.091 | 18.858 | 229.856 |
| 480 | 14.005 | 10.014 | 211.504 | 880 | 26.415 | 19.099 | 230.227 |
| 490 | 14.302 | 10.228 | 212.117 | 890 | 26.740 | 19.341 | 230.593 |
| 500 | 14.600 | 10.443 | 212.719 | 900 | 27.066 | 19.583 | 230.957 |
| 510 | 14.898 | 10.658 | 213.310 | 910 | 27.392 | 19.826 | 231.317 |
| 520 | 15.197 | 10.874 | 213.890 | 920 | 27.719 | 20.070 | 231.674 |
| 530 | 15.497 | 11.090 | 214.460 | 930 | 28.046 | 20.314 | 232.028 |
| 540 | 15.797 | 11.307 | 215.020 | 940 | 28.375 | 20.559 | 232.379 |
| 550 | 16.097 | 11.524 | 215.572 | 950 | 28.703 | 20.805 | 232.727 |
| 560 | 16.399 | 11.743 | 216.115 | 960 | 29.033 | 21.051 | 233.072 |
| 570 | 16.701 | 11.961 | 216.649 | 970 | 29.362 | 21.298 | 233.413 |
| 580 | 17.003 | 12.181 | 217.175 | 980 | 29.693 | 21.545 | 233.752 |
| 590 | 17.307 | 12.401 | 217.693 | 990 | 30.024 | 21.793 | 234.088 |

Fuente: JANAF (1971) Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37



Dióxido de carbono (CO_2)

($\Delta h_f^\circ = 0 \text{ kJ/kmol}$; T, K ; \bar{h} y \bar{u} , kJ/kmol ; \bar{s}° , $\text{kJ/(kmol} \cdot \text{K)}$; el estado estándar es 1 atm)

| T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° | T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° |
|-----|-----------|-----------|-----------------|-----|-----------|-----------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 22.280 | 17.291 | 243.199 |
| 220 | 6.601 | 4.772 | 202.966 | 610 | 22.754 | 17.683. | 243.983 |
| 230 | 6.938 | 5.026 | 204.464 | 620 | 23.321 | 18.076 | 244.758 |
| 240 | 7.280 | 5.285 | 205.920 | 630 | 23.709 | 18.471 | 245.524 |
| 250 | 7.627 | 5.548 | 207.337 | 640 | 24.190 | 18.869 | 246.282 |
| 260 | 7.979 | 5.817 | 208.717 | 650 | 24.674 | 19.270 | 247.032 |
| 270 | 8.335 | 6.091 | 210.062 | 660 | 25.160 | 19.672 | 247.773 |
| 280 | 8.697 | 6.369 | 211.376 | 670 | 25.648 | 20.078 | 248.507 |
| 290 | 9.063 | 6.651 | 212.660 | 680 | 26.138 | 20.484 | 249.233 |
| 298 | 9.364 | 6.885 | 213.685 | 690 | 26.631 | 20.894 | 249.952 |
| 300 | 9.431 | 6.939 | 213.915 | 700 | 27.125 | 21.305 | 250.663 |
| 310 | 9.807 | 7.230 | 215.146 | 710 | 27.622 | 21.719 | 251.368 |
| 320 | 10.186 | 7.526 | 216.351 | 720 | 28.121 | 22.134 | 252.065 |
| 330 | 10.570 | 7.826 | 217.534 | 730 | 28.622 | 22.552 | 252.755 |
| 340 | 10.959 | 8.131 | 218.694 | 740 | 29.124 | 22.972 | 253.539 |
| 350 | 11.351 | 8.439 | 219.831 | 750 | 29.629 | 23.393 | 254.117 |
| 360 | 11.748 | 8.752 | 220.948 | 760 | 30.135 | 23.817 | 254.787 |
| 370 | 12.148 | 9.068 | 222.044 | 770 | 30.644 | 24.242 | 255.452 |
| 380 | 12.552 | 9.392 | 223.122 | 780 | 31.154 | 24.669 | 256.110 |
| 390 | 12.960 | 9.718 | 224.182 | 790 | 31.665 | 25.097 | 256.762 |
| 400 | 13.372 | 10.046 | 225.225 | 800 | 32.179 | 25.527 | 257.408 |
| 410 | 13.787 | 10.378 | 226.250 | 810 | 32.694 | 25.959 | 258.048 |
| 420 | 14.206 | 10.714 | 227.258 | 820 | 33.212 | 26.394 | 258.682 |
| 430 | 14.628 | 11.053 | 228.252 | 830 | 33.730 | 26.829 | 259.311 |
| 440 | 15.054 | 11.393 | 229.230 | 840 | 34.251 | 27.267 | 259.934 |
| 450 | 15.483 | 11.742 | 230.194 | 850 | 34.773 | 27.706 | 260.551 |
| 460 | 15.916 | 12.091 | 231.144 | 860 | 35.296 | 28.125 | 261.164 |
| 470 | 16.351 | 12.444 | 232.080 | 870 | 35.821 | 28.588 | 261.770 |
| 480 | 16.791 | 12.800 | 233.004 | 880 | 36.347 | 29.031 | 262.371 |
| 490 | 17.232 | 13.158 | 233.916 | 890 | 36.876 | 29.476 | 262.968 |
| 500 | 17.678 | 13.521 | 234.814 | 900 | 37.405 | 29.922 | 263.559 |
| 510 | 18.126 | 13.885 | 235.700 | 910 | 37.935 | 30.369 | 264.146 |
| 520 | 18.576 | 14.253 | 236.575 | 920 | 38.467 | 30.818 | 264.728 |
| 530 | 19.029 | 14.622 | 237.439 | 930 | 39.000 | 31.268 | 265.304 |
| 540 | 19.485 | 14.996 | 238.292 | 940 | 39.535 | 31.719 | 265.877 |
| 550 | 19.945 | 15.372 | 239.135 | 950 | 40.070 | 32.171 | 266.444 |
| 560 | 20.407 | 15.751 | 239.962 | 960 | 40.607 | 32.625 | 267.007 |
| 570 | 20.870 | 16.131 | 240.789 | 970 | 41.145 | 33.081 | 267.566 |
| 580 | 21.337 | 16.515 | 241.602 | 980 | 41.685 | 33.537 | 268.119 |
| 590 | 21.807 | 16.902 | 242.405 | 990 | 42.226 | 33.995 | 268.670 |

Fuente: JANAF (1971) Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37

Agua (H_2O)

($\Delta h_f^\circ = 0 \text{ kJ/kmol}$; T, K; \bar{h} y \bar{u} , kJ/kmol; \bar{s}° , kJ/(kmol · K); el estado estándar es 1 atm)

| T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° | T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° |
|-----|-----------|-----------|-----------------|-----|-----------|-----------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 20.402 | 15.413 | 212.920 |
| 220 | 7.295 | 5.466 | 178.576 | 610 | 20.765 | 15.639 | 213.529 |
| 230 | 7.628 | 5.715 | 180.054 | 620 | 21.130 | 15.975 | 214.122 |
| 240 | 7.961 | 5.965 | 181.471 | 630 | 21.495 | 16.257 | 214.707 |
| 250 | 8.294 | 6.215 | 182.831 | 640 | 21.862 | 16.541 | 215.285 |
| 260 | 8.627 | 6.466 | 184.139 | 650 | 22.230 | 16.826 | 215.856 |
| 270 | 8.961 | 6.716 | 185.399 | 660 | 22.600 | 17.112 | 216.419 |
| 280 | 9.296 | 6.968 | 186.616 | 670 | 22.970 | 17.399 | 216.976 |
| 290 | 9.631 | 7.219 | 187.791 | 680 | 23.342 | 17.688 | 217.527 |
| 298 | 9.904 | 7.425 | 188.720 | 690 | 23.714 | 17.978 | 218.071 |
| 300 | 9.966 | 7.472 | 188.928 | 700 | 24.088 | 18.268 | 218.610 |
| 310 | 10.302 | 7.725 | 190.030 | 710 | 24.464 | 18.561 | 219.142 |
| 320 | 10.639 | 7.978 | 191.098 | 720 | 24.840 | 18.854 | 219.668 |
| 330 | 10.976 | 8.232 | 192.136 | 730 | 25.218 | 19.148 | 220.189 |
| 340 | 11.314 | 8.487 | 193.144 | 740 | 25.597 | 19.444 | 220.707 |
| 350 | 11.652 | 8.742 | 194.125 | 750 | 25.977 | 19.741 | 221.215 |
| 360 | 11.992 | 8.998 | 195.081 | 760 | 26.358 | 20.039 | 221.720 |
| 370 | 12.331 | 9.255 | 196.012 | 770 | 26.741 | 20.339 | 222.221 |
| 380 | 12.672 | 9.513 | 196.920 | 780 | 27.125 | 20.639 | 222.717 |
| 390 | 13.014 | 9.771 | 197.807 | 790 | 27.510 | 20.941 | 223.207 |
| 400 | 13.356 | 10.030 | 198.673 | 800 | 27.896 | 21.245 | 223.693 |
| 410 | 13.699 | 10.290 | 199.521 | 810 | 28.284 | 21.549 | 224.174 |
| 420 | 14.043 | 10.551 | 200.350 | 820 | 28.672 | 21.855 | 224.651 |
| 430 | 14.388 | 10.813 | 201.660 | 830 | 29.062 | 22.162 | 225.123 |
| 440 | 14.734 | 11.075 | 201.955 | 840 | 29.454 | 22.470 | 225.592 |
| 450 | 15.080 | 11.339 | 202.734 | 850 | 29.846 | 22.779 | 226.057 |
| 460 | 15.428 | 11.603 | 203.497 | 860 | 30.240 | 23.090 | 226.517 |
| 470 | 15.777 | 11.869 | 204.247 | 870 | 30.635 | 23.402 | 226.973 |
| 480 | 16.126 | 12.135 | 204.982 | 880 | 31.032 | 23.715 | 227.426 |
| 490 | 16.477 | 12.403 | 205.705 | 890 | 31.429 | 24.029 | 227.875 |
| 500 | 16.828 | 12.671 | 206.413 | 900 | 31.828 | 24.345 | 228.321 |
| 510 | 17.181 | 12.940 | 207.112 | 910 | 32.228 | 24.662 | 228.763 |
| 520 | 17.534 | 13.211 | 207.799 | 920 | 32.629 | 24.980 | 229.202 |
| 530 | 17.889 | 13.482 | 207.475 | 930 | 33.032 | 25.300 | 229.637 |
| 540 | 18.245 | 13.755 | 209.139 | 940 | 33.436 | 25.621 | 230.070 |
| 550 | 18.601 | 14.028 | 209.795 | 950 | 33.841 | 25.943 | 230.499 |
| 560 | 18.959 | 14.303 | 210.440 | 960 | 34.247 | 26.265 | 230.924 |
| 570 | 19.318 | 14.579 | 211.075 | 970 | 34.653 | 26.588 | 231.347 |
| 580 | 19.678 | 14.856 | 211.702 | 980 | 35.061 | 26.913 | 231.767 |
| 590 | 20.039 | 15.134 | 212.320 | 990 | 35.472 | 27.240 | 232.184 |

Fuente: JANAF (1971) Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37



Hidrógeno diatómico (H_2)

($\Delta h_f^\circ = 0 \text{ kJ/kmol}$; T, K; \bar{h} y \bar{u} , kJ/kmol; \bar{s}° , kJ/(kmol · K); el estado estándar es 1 atm)

| T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° | T | \bar{h} | \bar{u} | \bar{s}° |
|-------|-----------|-----------|-----------------|-------|-----------|-----------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1.440 | 42.808 | 30.835 | 177.410 |
| 260 | 7.370 | 5.209 | 126.636 | 1.480 | 44.091 | 31.786 | 178.291 |
| 270 | 7.657 | 5.412 | 127.719 | 1.520 | 45.384 | 32.746 | 179.153 |
| 280 | 7.945 | 5.617 | 128.765 | 1.560 | 46.683 | 33.713 | 179.995 |
| 290 | 8.233 | 5.822 | 129.775 | 1.600 | 47.990 | 34.687 | 180.820 |
| 298 | 8.468 | 5.989 | 130.574 | 1.640 | 49.303 | 35.668 | 181.632 |
| 300 | 8.522 | 6.027 | 130.754 | 1.680 | 50.662 | 36.654 | 182.428 |
| 320 | 9.100 | 6.440 | 132.621 | 1.720 | 51.947 | 37.646 | 183.208 |
| 340 | 9.680 | 6.853 | 134.378 | 1.760 | 53.279 | 38.645 | 183.973 |
| 360 | 10.262 | 7.268 | 136.039 | 1.800 | 54.618 | 39.652 | 184.724 |
| 380 | 10.843 | 7.684 | 137.612 | 1.840 | 55.962 | 40.663 | 185.463 |
| 400 | 11.426 | 8.100 | 139.106 | 1.880 | 57.311 | 41.680 | 186.190 |
| 420 | 12.010 | 8.518 | 140.529 | 1.920 | 58.668 | 42.705 | 186.904 |
| 440 | 12.594 | 8.936 | 141.888 | 1.960 | 60.031 | 43.735 | 187.607 |
| 460 | 13.179 | 9.355 | 143.187 | 2.000 | 61.400 | 44.771 | 188.297 |
| 480 | 13.764 | 9.773 | 144.432 | 2.050 | 63.119 | 46.074 | 189.148 |
| 500 | 14.350 | 10.193 | 145.628 | 2.100 | 64.847 | 47.386 | 189.979 |
| 520 | 14.935 | 10.611 | 146.775 | 2.150 | 66.584 | 48.708 | 190.796 |
| 560 | 16.107 | 11.451 | 148.945 | 2.200 | 68.328 | 50.037 | 191.598 |
| 600 | 17.280 | 12.291 | 150.698 | 2.250 | 70.080 | 51.373 | 192.385 |
| 640 | 18.453 | 13.133 | 152.863 | 2.300 | 71.839 | 52.716 | 193.159 |
| 680 | 19.630 | 13.976 | 154.645 | 2.350 | 73.608 | 54.069 | 193.921 |
| 720 | 20.807 | 14.821 | 156.328 | 2.400 | 75.383 | 55.429 | 194.669 |
| 760 | 21.988 | 15.669 | 157.923 | 2.450 | 77.168 | 56.798 | 195.403 |
| 800 | 23.171 | 16.520 | 159.440 | 2.500 | 78.960 | 58.175 | 196.125 |
| 840 | 24.359 | 17.375 | 160.891 | 2.550 | 80.755 | 59.554 | 196.837 |
| 880 | 25.551 | 18.235 | 162.277 | 2.600 | 82.558 | 60.941 | 197.539 |
| 920 | 26.747 | 19.098 | 163.607 | 2.650 | 84.386 | 62.335 | 198.229 |
| 960 | 27.948 | 19.966 | 164.884 | 2.700 | 86.186 | 63.737 | 198.907 |
| 1.000 | 29.154 | 20.839 | 166.114 | 2.750 | 88.008 | 65.144 | 199.575 |
| 1.040 | 30.364 | 21.717 | 167.300 | 2.800 | 89.838 | 66.558 | 200.234 |
| 1.080 | 31.580 | 22.601 | 168.449 | 2.850 | 91.671 | 67.976 | 200.885 |
| 1.120 | 32.802 | 23.490 | 169.560 | 2.900 | 93.512 | 69.401 | 201.527 |
| 1.160 | 34.028 | 24.384 | 170.636 | 2.950 | 95.358 | 70.831 | 202.157 |
| 1.200 | 35.262 | 25.284 | 171.682 | 3.000 | 97.211 | 72.268 | 202.778 |
| 1.240 | 36.502 | 26.192 | 172.698 | 3.050 | 99.065 | 73.707 | 203.391 |
| 1.280 | 37.749 | 27.106 | 173.687 | 3.100 | 100.926 | 75.152 | 203.995 |
| 1.320 | 39.002 | 28.027 | 174.652 | 3.150 | 102.793 | 76.604 | 204.592 |
| 1.360 | 40.263 | 28.995 | 175.593 | 3.200 | 104.667 | 78.061 | 205.181 |
| 1.400 | 41.530 | 29.889 | 176.510 | 3.250 | 106.545 | 79.523 | 205.765 |

Fuente: JANAF (1971) Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37



Conductividades molares límite de los iones a 25 °C; $\lambda^\infty / 10^{-4}$ S m²/mol

| Ion | λ^∞ | $\frac{\lambda^\infty}{z^2}$ | Ion | λ^∞ | $\frac{\lambda^\infty}{z^2}$ |
|--|------------------|------------------------------|--|------------------|------------------------------|
| H ⁺ | 349.81 | 349.81 | OH ⁻ | 198.3 | 198.3 |
| Li ⁺ | 38.68 | 38.68 | F ⁻ | 55.4 | 55.4 |
| Na ⁺ | 50.10 | 50.10 | Cl ⁻ | 76.35 | 76.35 |
| K ⁺ | 73.50 | 73.50 | Br ⁻ | 78.14 | 78.14 |
| Rb ⁺ | 77.81 | 77.81 | I ⁻ | 76.84 | 76.84 |
| Cs ⁺ | 77.26 | 77.26 | NO ₃ ⁻ | 71.46 | 71.46 |
| Ag ⁺ | 61.90 | 61.90 | ClO ₃ ⁻ | 64.6 | 64.6 |
| NH ₄ ⁺ | 73.55 | 73.55 | BrO ₃ ⁻ | 55.74 | 55.74 |
| (CH ₃) ₄ N ⁺ | 44.92 | 44.92 | IO ₃ ⁻ | 40.54 | 40.54 |
| (C ₂ H ₅) ₄ N ⁺ | 32.66 | 32.66 | ClO ₄ ⁻ | 67.36 | 67.36 |
| (C ₃ H ₇) ₄ N ⁺ | 23.42 | 23.42 | IO ₄ ⁻ | 54.55 | 54.55 |
| Be ²⁺ | 90 | 22.5 | HCO ₃ ⁻ | 44.50 | 44.50 |
| Mg ²⁺ | 106.10 | 26.52 | HCOO ⁻ | 54.59 | 54.59 |
| Ca ²⁺ | 119.00 | 29.75 | CH ₃ COO ⁻ | 40.90 | 40.90 |
| Sr ²⁺ | 118.90 | 29.72 | CH ₂ BrCOO ⁻ | 39.22 | 39.22 |
| Ba ²⁺ | 127.26 | 31.82 | (NO ₂) ₃ C ₆ H ₂ O ⁻ | 30.39 | 30.39 |
| Cu ²⁺ | 107.2 | 26.80 | SO ₄ ²⁻ | 160.04 | 40.01 |
| Zn ²⁺ | 105.6 | 26.40 | C ₂ O ₄ ²⁻ | 148.30 | 37.08 |
| Co ²⁺ | 110 | 27.5 | CO ₃ ²⁻ | 138.6 | 34.65 |
| Pb ²⁺ | 139.0 | 34.75 | Fe(CN) ₆ ³⁻ | 302.7 | 33.63 |
| La ³⁺ | 209.1 | 23.23 | P ₃ O ₉ ³⁻ | 250.8 | 27.87 |
| Ce ³⁺ | 209.4 | 23.26 | Fe(CN) ₆ ⁴⁻ | 442.0 | 27.63 |
| [Co(NH ₃) ₆] ³⁺ | 305.7 | 33.97 | P ₄ O ₁₂ ⁴⁻ | 374.8 | 23.43 |
| [Ni ₂ tri-en ₃] ⁴⁺ | 210.0 | 13.13 | P ₂ O ₇ ⁴⁻ | 383.6 | 23.98 |
| [Co ₂ tri-en ₃] ⁶⁺ | 412.2 | 11.45 | P ₃ O ₁₀ ⁵⁻ | 545 | 21.8 |

Fuente: Castellan, G. (1987) Fisicoquímica. Ed. Addison Wesley. Pp. 820
(Con permiso de R. A. Robinson y R. H. Stokes, Electrolyte Solutions, 2^a ed. (revisada) Butterworths, Londres, 1959)



Número de tubos en configuraciones comerciales de carcaza y tubos, 1 paso por carcaza, n pasos de tubos

| Tubos de 3/4" de diámetro exterior | Pitch triangular de 1" | | | | |
|-------------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 8 | 37 | 30 | 24 | 24 | |
| 10 | 61 | 52 | 40 | 36 | |
| 12 | 92 | 82 | 76 | 74 | 70 |
| 13 1/4 | 109 | 106 | 86 | 82 | 74 |
| 15 1/4 | 151 | 138 | 122 | 118 | 110 |
| 17 1/4 | 203 | 196 | 178 | 172 | 166 |
| 19 1/4 | 262 | 250 | 226 | 216 | 210 |
| 21 1/4 | 316 | 302 | 278 | 272 | 260 |
| 23 1/4 | 384 | 376 | 352 | 342 | 328 |
| 25 | 470 | 452 | 422 | 394 | 382 |
| 27 | 559 | 534 | 488 | 474 | 464 |
| 29 | 630 | 604 | 556 | 538 | 508 |
| 31 | 745 | 728 | 678 | 666 | 640 |
| 33 | 856 | 830 | 774 | 760 | 732 |
| 35 | 970 | 938 | 882 | 864 | 848 |
| 37 | 1 074 | 1 044 | 1 012 | 986 | 870 |
| 39 | 1 026 | 1 176 | 1 128 | 1 100 | 1 078 |

| Tubos de 1" de diámetro exterior | Pitch triangular de 1 1/4" | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 8 | 21 | 16 | 16 | 14 | |
| 10 | 32 | 32 | 26 | 24 | |
| 12 | 55 | 52 | 48 | 46 | 44 |
| 13 1/4 | 68 | 66 | 58 | 54 | 50 |
| 15 1/4 | 91 | 86 | 80 | 74 | 72 |
| 17 1/4 | 131 | 118 | 106 | 104 | 94 |
| 19 1/4 | 163 | 152 | 140 | 136 | 128 |
| 21 1/4 | 199 | 188 | 170 | 164 | 160 |
| 23 1/4 | 241 | 232 | 212 | 212 | 202 |
| 25 | 294 | 282 | 256 | 252 | 242 |
| 27 | 349 | 334 | 302 | 296 | 286 |
| 29 | 397 | 376 | 338 | 334 | 316 |
| 31 | 472 | 454 | 430 | 424 | 400 |
| 33 | 538 | 522 | 486 | 470 | 454 |
| 35 | 608 | 592 | 562 | 546 | 532 |
| 37 | 674 | 664 | 632 | 614 | 598 |
| 39 | 766 | 736 | 700 | 688 | 672 |



| Tubos de 3/4" de diámetro exterior | Pitch triangular de 15/16" | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 8 | 36 | 32 | 26 | 24 | 18 |
| 10 | 62 | 56 | 47 | 42 | 36 |
| 12 | 109 | 98 | 86 | 82 | 78 |
| 13 1/4 | 127 | 114 | 96 | 90 | 86 |
| 15 1/4 | 170 | 160 | 140 | 136 | 128 |
| 17 1/4 | 239 | 224 | 194 | 188 | 178 |
| 19 1/4 | 301 | 282 | 252 | 244 | 234 |
| 21 1/4 | 361 | 342 | 314 | 306 | 290 |
| 23 1/4 | 442 | 420 | 386 | 378 | 364 |
| 25 | 532 | 506 | 468 | 446 | 434 |
| 27 | 637 | 602 | 550 | 536 | 524 |
| 29 | 721 | 692 | 640 | 620 | 594 |
| 31 | 847 | 822 | 766 | 722 | 720 |
| 33 | 974 | 938 | 878 | 852 | 826 |
| 35 | 1 102 | 1 068 | 1 004 | 988 | 958 |
| 37 | 1 240 | 1 200 | 1 144 | 1 104 | 1 072 |
| 39 | 1 377 | 1 330 | 1 258 | 1 248 | 1 212 |

| Tubos de 3/4" de diámetro exterior | Pitch cuadrado de 1" | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|-------|-----|-----|-----|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 8 | 32 | 26 | 20 | 20 | |
| 10 | 52 | 52 | 40 | 36 | |
| 12 | 81 | 76 | 68 | 68 | 60 |
| 13 1/4 | 97 | 90 | 82 | 76 | 70 |
| 15 1/4 | 137 | 124 | 116 | 108 | 108 |
| 17 1/4 | 177 | 166 | 158 | 150 | 142 |
| 19 1/4 | 224 | 220 | 204 | 192 | 188 |
| 21 1/4 | 277 | 270 | 246 | 240 | 234 |
| 23 1/4 | 341 | 324 | 308 | 302 | 292 |
| 25 | 413 | 394 | 370 | 356 | 346 |
| 27 | 481 | 460 | 432 | 420 | 408 |
| 29 | 553 | 526 | 480 | 468 | 456 |
| 31 | 657 | 640 | 600 | 580 | 560 |
| 33 | 749 | 718 | 688 | 676 | 648 |
| 35 | 845 | 824 | 780 | 766 | 748 |
| 37 | 934 | 914 | 886 | 866 | 838 |
| 39 | 1 049 | 1 024 | 982 | 968 | 948 |



| Tubos de 1" de diámetro exterior | Pitch cuadrado de 1 1/4" | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 8 | 21 | 16 | 14 | | |
| 10 | 32 | 32 | 26 | 24 | |
| 12 | 48 | 45 | 40 | 38 | 36 |
| 13 1/4 | 61 | 56 | 52 | 48 | 44 |
| 15 1/4 | 81 | 76 | 68 | 68 | 64 |
| 17 1/4 | 112 | 112 | 96 | 90 | 82 |
| 19 1/4 | 138 | 132 | 128 | 122 | 116 |
| 21 1/4 | 177 | 166 | 158 | 152 | 148 |
| 23 1/4 | 213 | 208 | 192 | 184 | 184 |
| 25 | 260 | 252 | 238 | 226 | 222 |
| 27 | 300 | 288 | 278 | 268 | 260 |
| 29 | 341 | 326 | 300 | 294 | 286 |
| 31 | 406 | 398 | 380 | 368 | 358 |
| 33 | 465 | 460 | 432 | 420 | 414 |
| 35 | 522 | 518 | 488 | 484 | 472 |
| 37 | 596 | 574 | 562 | 544 | 532 |
| 39 | 665 | 644 | 624 | 612 | 600 |

| Tubos de 1 1/4" de diámetro exterior | Pitch cuadrado de 1 9/16" | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 10 | 16 | 12 | 10 | | |
| 12 | 30 | 24 | 22 | 16 | 16 |
| 13 1/4 | 32 | 30 | 30 | 22 | 22 |
| 15 1/4 | 44 | 40 | 37 | 35 | 31 |
| 17 1/4 | 56 | 53 | 51 | 48 | 44 |
| 19 1/4 | 78 | 73 | 71 | 64 | 56 |
| 21 1/4 | 96 | 90 | 86 | 82 | 78 |
| 23 1/4 | 127 | 112 | 106 | 102 | 96 |
| 25 | 140 | 135 | 127 | 123 | 115 |
| 27 | 166 | 160 | 151 | 146 | 140 |
| 29 | 193 | 188 | 178 | 174 | 166 |
| 31 | 226 | 220 | 209 | 202 | 193 |
| 33 | 258 | 252 | 244 | 238 | 226 |
| 35 | 293 | 287 | 275 | 268 | 256 |
| 37 | 334 | 322 | 311 | 304 | 293 |
| 39 | 370 | 362 | 348 | 342 | 336 |



| Tubos de 1 1/2" de diámetro exterior | Pitch cuadrado de 1 7/8" | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Diámetro interior de la coraza (in) | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 12 | 16 | 16 | 12 | 12 | |
| 13 1/4 | 22 | 22 | 16 | 16 | |
| 15 1/4 | 29 | 29 | 24 | 24 | 22 |
| 17 1/4 | 39 | 39 | 34 | 32 | 29 |
| 19 1/4 | 50 | 48 | 45 | 43 | 39 |
| 21 1/4 | 62 | 60 | 57 | 54 | 50 |
| 23 1/4 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 |
| 25 | 94 | 90 | 86 | 84 | 78 |
| 27 | 112 | 108 | 102 | 98 | 94 |
| 29 | 131 | 127 | 120 | 116 | 112 |
| 31 | 151 | 146 | 141 | 138 | 131 |
| 33 | 176 | 170 | 164 | 160 | 151 |
| 35 | 202 | 196 | 188 | 182 | 176 |
| 37 | 224 | 220 | 217 | 210 | 202 |
| 39 | 252 | 246 | 237 | 230 | 224 |



Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

| Temp. ° C | Presión bar | Volumen específico m ³ /kg | | Energía interna kJ/kg | | Entalpía kJ/kg | | | Entropía kJ/kg, K | | |
|--------------|----------------|--|----------------|--------------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|--|
| | | Líquido sat, | Vapor sat, | Líquido sat, | Vapor sat, | Líquido sat, | Vapor vaportz | Vapor sat, | Líquido sat, | Vapor sat, | |
| | | v _l × 10 ³ | v _g | u _l | u _g | h _f | h _{fg} | h _g | s _f | S _g | |
| .01 | 0.00611 | 1.0002 | 206.136 | 0.00 | 2 375.3 | 0.01 | 2 501.3 | 2 501.4 | 0.0000 | 9.1562 | |
| 4 | 0.00813 | 1.0001 | 157.232 | 16.77 | 2 380.9 | 16.78 | 2 491.9 | 2 508.7 | 0.0610 | 9.0514 | |
| 5 | 0.00872 | 1.0001 | 147.120 | 20.97 | 2 382.3 | 20.98 | 2 489.6 | 2 510.6 | 0.0761 | 9.0257 | |
| 6 | 0.00935 | 1.0001 | 137.734 | 25.19 | 2 383.6 | 25.20 | 2 487.2 | 2 512.4 | 0.0912 | 9.0003 | |
| 8 | 0.01072 | 1.0002 | 120.917 | 33.59 | 2 386.4 | 33.60 | 2 482.5 | 2 516.1 | 0.1212 | 8.9501 | |
| 10 | 0.01228 | 1.0004 | 106.379 | 42.00 | 2 389.2 | 42.01 | 2 477.7 | 2 519.8 | 0.1510 | 8.9008 | |
| 11 | 0.01312 | 1.0004 | 99.857 | 46.20 | 2 390.5 | 46.20 | 2 475.4 | 2 521.6 | 0.1658 | 8.8765 | |
| 12 | 0.01402 | 1.0005 | 93.784 | 50.41 | 2 391.9 | 50.41 | 2 473.0 | 2 523.4 | 0.1806 | 8.8524 | |
| 13 | 0.01497 | 1.0007 | 88.124 | 54.60 | 2 393.3 | 54.60 | 2 470.7 | 2 525.3 | 0.1953 | 8.8285 | |
| 14 | 0.01598 | 1.0008 | 82.848 | 58.79 | 2 394.7 | 58.80 | 2 468.3 | 2 527.1 | 0.2099 | 8.8048 | |
| 15 | 0.01705 | 1.0009 | 77.926 | 62.99 | 2 396.1 | 62.99 | 2 465.9 | 2 528.9 | 0.2245 | 8.7814 | |
| 16 | 0.01818 | 1.0011 | 73.333 | 67.18 | 2 397.4 | 67.19 | 2 463.6 | 2 530.8 | 0.2390 | 8.7582 | |
| 17 | 0.01938 | 1.0012 | 69.044 | 71.38 | 2 398.8 | 71.38 | 2 461.2 | 2 532.6 | 0.2535 | 8.7351 | |
| 18 | 0.02064 | 1.0014 | 65.038 | 75.57 | 2 400.2 | 75.58 | 2 458.8 | 2 534.4 | 0.2679 | 8.7123 | |
| 19 | 0.02198 | 1.0016 | 61.293 | 79.76 | 2 401.6 | 79.77 | 2 456.5 | 2 536.2 | 0.2823 | 8.6897 | |
| 20 | 0.02339 | 1.0018 | 57.791 | 83.95 | 2 402.9 | 83.96 | 2 454.1 | 2 538.1 | 0.2966 | 8.6672 | |
| 21 | 0.02487 | 1.0020 | 54.514 | 88.14 | 2 404.3 | 88.14 | 2 451.8 | 2 539.9 | 0.3109 | 8.6450 | |
| 22 | 0.02645 | 1.0022 | 51.447 | 92.32 | 2 405.7 | 92.33 | 2 449.4 | 2 541.7 | 0.3251 | 8.6229 | |
| 23 | 0.02810 | 1.0024 | 48.574 | 96.51 | 2 407.0 | 96.52 | 2 447.0 | 2 543.5 | 0.3393 | 8.6011 | |
| 24 | 0.02985 | 1.0027 | 45.883 | 100.70 | 2 408.4 | 100.70 | 2 444.7 | 2 545.4 | 0.3534 | 8.5794 | |
| 25 | 0.03169 | 1.0029 | 43.360 | 104.88 | 2 409.8 | 104.89 | 2 442.3 | 2 547.2 | 0.3674 | 8.5580 | |
| 26 | 0.03363 | 1.0032 | 40.994 | 109.06 | 2 411.1 | 109.07 | 2 439.9 | 2 549.0 | 0.3814 | 8.5367 | |
| 27 | 0.03567 | 1.0035 | 38.774 | 113.25 | 2 412.5 | 113.25 | 2 437.6 | 2 550.8 | 0.3954 | 8.5156 | |
| 28 | 0.03782 | 1.0037 | 36.690 | 117.42 | 2 413.9 | 117.43 | 2 435.2 | 2 552.6 | 0.4093 | 8.4946 | |
| 29 | 0.04008 | 1.0040 | 34.733 | 121.60 | 2 415.2 | 121.61 | 2 432.8 | 2 554.8 | 0.4231 | 8.4739 | |
| 30 | 0.04246 | 1.0043 | 32.894 | 125.78 | 2 416.6 | 125.79 | 2 430.5 | 2 556.3 | 0.4369 | 8.4533 | |
| 31 | 0.04496 | 1.0046 | 31.165 | 129.96 | 2 418.0 | 129.97 | 2 428.1 | 2 558.1 | 0.4507 | 8.4329 | |
| 32 | 0.04759 | 1.0050 | 29.540 | 134.14 | 2 419.3 | 134.15 | 2 425.7 | 2 559.9 | 0.4644 | 8.4127 | |
| 33 | 0.05034 | 1.0053 | 28.011 | 138.32 | 2 420.7 | 138.33 | 2 423.4 | 2 561.7 | 0.4781 | 8.3927 | |
| 34 | 0.05324 | 1.0056 | 26.571 | 142.50 | 2 422.0 | 142.50 | 2 421.0 | 2 563.5 | 0.4917 | 8.3728 | |
| 35 | 0.05628 | 1.0060 | 25.216 | 146.67 | 2 423.4 | 146.68 | 2 418.6 | 2 565.3 | 0.5053 | 8.3531 | |
| 36 | 0.05947 | 1.0063 | 23.940 | 150.85 | 2 424.7 | 150.86 | 2 416.2 | 2 567.1 | 0.5188 | 8.3336 | |
| 38 | 0.06632 | 1.0071 | 21.602 | 159.20 | 2 427.4 | 159.21 | 2 411.5 | 2 570.7 | 0.5458 | 8.2950 | |
| 40 | 0.07384 | 1.0078 | 19.523 | 167.56 | 2 430.1 | 167.57 | 2 406.7 | 2 574.3 | 0.5725 | 8.2570 | |
| 45 | 0.09593 | 1.0099 | 15.258 | 188.44 | 2 436.8 | 188.45 | 2 394.8 | 2 583.2 | 0.6387 | 8.1648 | |
| 50 | 0.1235 | 1.0121 | 12.032 | 209.32 | 2 443.5 | 209.33 | 2 382.7 | 2 592.1 | .7038 | 8.0763 | |
| 55 | 0.1576 | 1.0146 | 9.568 | 230.21 | 2 450.1 | 230.23 | 2 370.7 | 2 600.9 | .7679 | 7.9913 | |
| 60 | 0.1994 | 1.0172 | 7.671 | 251.11 | 2 456.6 | 251.13 | 2 358.5 | 2 609.6 | .8312 | 7.9096 | |
| 65 | 0.2503 | 1.0199 | 6.197 | 272.02 | 2 463.1 | 272.06 | 2 346.2 | 2 618.3 | .8935 | 7.8310 | |
| 70 | 0.3119 | 1.0228 | 5.042 | 292.95 | 2 469.6 | 292.98 | 2 333.8 | 2 626.8 | .9549 | 7.7553 | |
| 75 | 0.3858 | 1.0259 | 4.131 | 313.90 | 2 475.9 | 313.93 | 2 321.4 | 2 635.3 | 1.0155 | 7.6824 | |
| 80 | 0.4739 | 1.0291 | 3.407 | 334.86 | 2 482.2 | 334.91 | 2 308.8 | 2 643.7 | 1.0753 | 7.6122 | |
| 85 | 0.5783 | 1.0325 | 2.828 | 355.84 | 2 488.4 | 355.90 | 2 296.0 | 2 651.9 | 1.1343 | 7.5445 | |
| 90 | 0.7014 | 1.0360 | 2.361 | 376.85 | 2 494.5 | 376.92 | 2 283.2 | 2 660.1 | 1.1925 | 7.4791 | |
| 95 | 0.8455 | 1.0397 | 1.982 | 397.88 | 2 500.6 | 397.96 | 2 270.2 | 2 668.1 | 1.2500 | 7.4159 | |
| 100 | 1.014 | 1.0435 | 1.673 | 418.94 | 2 506.5 | 419.04 | 2 257.0 | 2 676.1 | 1.3069 | 7.3549 | |
| 110 | 1.433 | 1.0516 | 1.210 | 461.14 | 2 518.1 | 461.30 | 2 230.2 | 2 691.5 | 1.4185 | 7.2387 | |
| 120 | 1.985 | 1.0603 | 0.8919 | 503.50 | 2 529.3 | 503.71 | 2 202.6 | 2 706.3 | 1.5276 | 7.1296 | |
| 130 | 2.701 | 1.0697 | 0.6685 | 546.02 | 2 539.9 | 546.31 | 2 174.2 | 2 720.5 | 1.6344 | 7.0269 | |
| 140 | 3.613 | 1.0797 | 0.5089 | 588.74 | 2 550.0 | 589.13 | 2 144.7 | 2 733.9 | 1.7391 | 6.9299 | |
| 150 | 4.758 | 1.0905 | 0.3928 | 631.68 | 2 559.5 | 632.20 | 2 114.3 | 2 746.5 | 1.8418 | 6.8379 | |
| 160 | 6.178 | 1.1020 | 0.3071 | 674.86 | 2 568.4 | 675.55 | 2 082.6 | 2 758.1 | 1.9427 | 6.7502 | |
| 170 | 7.917 | 1.1143 | 0.2428 | 718.33 | 2 576.5 | 719.21 | 2 049.5 | 2 768.7 | 2.0419 | 6.6663 | |
| 180 | 10.02 | 1.1274 | 0.1941 | 762.09 | 2 583.7 | 763.22 | 2 015.0 | 2 778.2 | 2.1396 | 6.5857 | |
| 190 | 12.54 | 1.1414 | 0.1565 | 806.19 | 2 590.0 | 807.62 | 1 978.8 | 2 786.4 | 2.2359 | 6.5079 | |
| 200 | 15.54 | 1.1565 | 0.1274 | 850.65 | 2 595.3 | 852.45 | 1 940.7 | 2 793.2 | 2.3309 | 6.4323 | |
| 210 | 19.06 | 1.1726 | 0.1044 | 895.53 | 2 599.5 | 897.76 | 1 900.7 | 2 798.5 | 2.4248 | 6.3858 | |
| 220 | 23.18 | 1.1900 | 0.08619 | 940.87 | 2 602.4 | 943.62 | 1 858.5 | 2 802.1 | 2.5178 | 6.2861 | |
| 230 | 27.95 | 1.2088 | 0.07158 | 986.74 | 2 603.9 | 990.12 | 1 813.8 | 2 804.0 | 2.6099 | 6.2146 | |
| 240 | 33.44 | 1.2291 | 0.05976 | 1 033.2 | 2 604.0 | 1 037.3 | 1 766.5 | 2 803.8 | 2.7015 | 6.1437 | |
| 250 | 39.73 | 1.2512 | 0.05013 | 1 080.4 | 2 602.4 | 1 085.4 | 1 716.2 | 2 801.5 | 2.7927 | 6.0730 | |
| 260 | 46.88 | 1.2755 | 0.04221 | 1 128.4 | 2 599.0 | 1 134.4 | 1 662.5 | 2 796.6 | 2.8838 | 6.0019 | |
| 270 | 54.99 | 1.3023 | 0.03564 | 1 177.4 | 2 593.7 | 1 184.5 | 1 605.2 | 2 789.7 | 2.9751 | 5.9301 | |
| 280 | 64.12 | 1.3321 | 0.03017 | 1 227.5 | 2 586.1 | 1 236.0 | 1 543.6 | 2 779.6 | 3.0668 | 5.8571 | |
| 290 | 74.36 | 1.3656 | 0.02557 | 1 278.9 | 2 576.0 | 1 289.1 | 1 477.1 | 2 766.2 | 3.1594 | 5.7821 | |
| 300 | 85.81 | 1.4036 | 0.02167 | 1 332.0 | 2 563.0 | 1 344.0 | 1 404.9 | 2 749.0 | 3.2534 | 5.7045 | |
| 320 | 112.7 | 1.4988 | 0.01549 | 1 444.6 | 2 525.5 | 1 461.5 | 1 238.6 | 2 700.1 | 3.4480 | 5.5362 | |
| 340 | 145.9 | 1.6379 | 0.01080 | 1 570.3 | 2 464.6 | 1 594.2 | 1 027.9 | 2 622.0 | 3.6594 | 5.3357 | |
| 360 | 186.5 | 1.8925 | 0.00695 | 1 725.2 | 2 351.5 | 1 760.5 | 720.5 | 2 481.0 | 3.9147 | 5.0526 | |
| 374.14 | 220.9 | 3.1550 | 0.003155 | 2 029.6 | 2 029.6 | 2 099.3 | 0 | 2 099.3 | 4.4298 | 4.4298 | |

Fuente: Foust, Wenzel, Clump, Maus & Andersen. Principios de operaciones unitarias.

Rugosidad relativa en función del diámetro para tubos de varios materiales (1 in = 25.4)



Tablas de vapor sobrecalentado

| T (°C) | P = 0.1 bar | | T _{sat} = 45.81 °C | | P = 1 bar | T _{sat} = 99.606 °C | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------------------------|-------------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|
| | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) |
| T _{sat} | 14.670 | 2 437.2 | 2 583.9 | 8.1488 | 1.6939 | 2 505.6 | 2 674.9 | 7.3588 |
| 50 | 14.867 | 2 443.3 | 2 592.0 | 8.1741 | 1.6959 | 2 506.2 | 2 675.8 | 7.3610 |
| 100 | 17.196 | 2 515.5 | 2 687.5 | 8.4489 | 1.9367 | 2 585.9 | 2 776.6 | 7.6148 |
| 150 | 19.513 | 2 587.9 | 2 783.0 | 8.6892 | 2.1724 | 2 658.2 | 2 875.5 | 7.8356 |
| 200 | 21.826 | 2 661.3 | 2 879.6 | 8.9049 | 2.4062 | 2 733.9 | 2 974.5 | 8.0346 |
| 250 | 24.136 | 2 736.1 | 2 977.4 | 9.1015 | 2.6388 | 2 810.6 | 3 074.5 | 8.2172 |
| 300 | 26.446 | 2 812.3 | 3 076.7 | 9.2827 | 3.1027 | 2 968.3 | 3 278.6 | 8.5452 |
| 400 | 31.063 | 2 969.3 | 3 279.9 | 9.6094 | 3.5655 | 3 132.2 | 3 488.7 | 8.8361 |
| 500 | 35.680 | 3 132.9 | 3 489.7 | 9.8998 | 4.0279 | 3 302.8 | 3 705.6 | 9.0998 |
| 600 | 40.296 | 3 303.3 | 3 706.3 | 10.1630 | 4.4900 | 3 480.4 | 3 929.4 | 9.3424 |
| 700 | 44.911 | 3 480.8 | 3 929.9 | 10.4060 | 4.9519 | 3 665.0 | 4 160.2 | 3.5681 |
| 800 | 49.527 | 3 665.3 | 4 160.6 | 10.6310 | 5.4132 | 3 856.6 | 4 392.0 | 9.7800 |
| 900 | 24.142 | 3 856.9 | 4 398.3 | 10.8430 | 5.8754 | 4 055.0 | 4 642.6 | 9.9800 |
| 1 000 | 58.758 | 4 055.2 | 4 642.8 | 11.0430 | 6.3370 | 4 257.3 | 4 891.0 | 10.1659 |
| 1 100 | 53.372 | 4 257.5 | 4 891.2 | 11.2287 | 6.7990 | 4 467.7 | 5 147.6 | 10.3463 |
| 1 200 | 67.987 | 4 467.9 | 5 147.8 | 11.4091 | 7.2600 | 4 683.5 | 5 409.5 | 10.5183 |
| 1 300 | 72.602 | 4 683.7 | 5 409.7 | 11.5811 | | | | |



| T (°C) | P = 2 bar | | T _{sat} = 120.21 °C | | P = 3 bar | | T _{sat} = 133.52 °C | | P = 4 bar | | T _{sat} = 143.61 °C | |
|------------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|
| | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | 0.88568 | 2 529.1 | 2 706.2 | 7.1269 | 0.60576 | 2543.2 | 2724.9 | 6.9916 | 0.46238 | 2 553.1 | 2 738.1 | 6.8955 |
| 150 | 0.95986 | 2 877.1 | 2 769.1 | 7.2810 | 0.63401 | 2571.0 | 2761.2 | 7.0791 | 0.47088 | 2 564.4 | 2 752.8 | 6.9306 |
| 200 | 1.08050 | 2 654.6 | 2 870.7 | 7.5081 | 0.71642 | 2651.0 | 2865.9 | 7.3131 | 0.53433 | 2 647.2 | 2 860.9 | 7.1723 |
| 250 | 1.19890 | 3 731.4 | 2 971.2 | 7.7100 | 0.79644 | 2728.9 | 2967.9 | 7.5180 | 0.59520 | 2 726.4 | 2 964.5 | 7.3804 |
| 300 | 1.31620 | 2 808.8 | 3 072.1 | 7.8941 | 0.87534 | 2807.0 | 3069.6 | 7.7037 | 0.65489 | 2 805.1 | 3 067.1 | 7.5677 |
| 400 | 1.54930 | 2 967.1 | 3 277.0 | 8.2236 | 1.0315 | 2966.0 | 3275.5 | 8.0347 | 0.77264 | 2 964.9 | 3 273.9 | 7.9002 |
| 500 | 1.78140 | 3 131.4 | 3 487.7 | 8.5152 | 1.18670 | 3130.6 | 3486.6 | 8.3271 | 0.88936 | 3 129.8 | 3 485.5 | 8.1933 |
| 600 | 2.01300 | 3 302.2 | 3 704.8 | 8.7792 | 1.34140 | 3301.6 | 3704.0 | 8.5914 | 1.00560 | 3 301.0 | 3 703.2 | 8.4580 |
| 700 | 2.24430 | 3 479.9 | 3 928.8 | 9.0220 | 1.4958 | 3479.5 | 3928.2 | 8.8344 | 1.12150 | 3 479.0 | 3 927.6 | 8.7012 |
| 800 | 2.47550 | 3 664.7 | 4 159.8 | 9.2479 | 1.65000 | 3664.3 | 4159.3 | 9.0604 | 1.23730 | 3 663.9 | 4 158.8 | 8.9273 |
| 900 | 2.70660 | 3 856.3 | 4 397.6 | 9.4598 | 1.80420 | 3856.0 | 4397.3 | 9.2724 | 1.35300 | 3 855.7 | 4 396.9 | 9.1394 |
| 1 000 | 2.93750 | 4 054.8 | 4 642.3 | 9.6599 | 1.95820 | 4054.5 | 4642.0 | 9.4726 | 1.46860 | 4 054.3 | 4 641.7 | 9.3396 |
| 1 100 | 3.16800 | 4 257.0 | 4 890.7 | 9.8458 | 2.11210 | 4256.8 | 4890.4 | 9.6585 | 1.58400 | 4 256.5 | 4 890.2 | 9.5256 |
| 1 200 | 3.39900 | 4 467.5 | 5 147.3 | 10.0262 | 2.26610 | 4467.2 | 5147.1 | 9.8389 | 1.69960 | 4 467.0 | 5 146.8 | 9.7060 |
| 1 300 | 3.63000 | 4 683.2 | 5 409.3 | 10.1982 | 2.42010 | 4683.0 | 5409.0 | 10.0110 | 1.81510 | 4 682.8 | 5 408.8 | 9.8780 |

| T (°C) | P = 5 bar | | T _{sat} = 151.83 °C | | P = 8 bar | | T _{sat} = 143.61 °C | | P = 10 bar | | T _{sat} = 179.88 °C | |
|------------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|
| | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | 0.37481 | 2 560.7 | 2 748.1 | 6.8207 | 0.24034 | 2 576.0 | 2 768.3 | 6.6616 | 0.19436 | 2 582.7 | 2 777.1 | 6.5850 |
| 200 | 0.42503 | 2 643.3 | 2 855.8 | 7.0610 | 0.26088 | 2 631.0 | 2 839.7 | 6.8176 | 0.20602 | 2 622.2 | 2 828.3 | 6.6955 |
| 250 | 0.47443 | 2 723.8 | 2 961.0 | 7.2724 | 0.29320 | 2 715.9 | 2 950.4 | 7.0401 | 0.23275 | 2 710.4 | 2 943.1 | 6.9265 |
| 300 | 0.52261 | 2 803.2 | 3 064.6 | 7.4614 | 0.32416 | 2 797.5 | 3 056.9 | 7.2345 | 0.25799 | 2 793.6 | 3 051.6 | 7.1246 |
| 350 | 0.57015 | 2 883.0 | 3 168.1 | 7.6346 | 0.35442 | 2 878.6 | 3 162.2 | 7.4106 | 0.28250 | 2 875.7 | 3 158.8 | 7.3029 |
| 400 | 0.61730 | 2 963.7 | 3 272.3 | 7.7955 | 0.38428 | 2 960.2 | 3 267.6 | 7.5734 | 0.30661 | 2 957.9 | 3 264.5 | 7.4669 |
| 500 | 0.71094 | 3 129.0 | 3 484.5 | 8.0892 | 0.44332 | 3 126.6 | 3 481.3 | 7.8692 | 0.35411 | 3 125.0 | 3 479.1 | 7.7641 |
| 600 | 0.80409 | 3 300.4 | 3 702.5 | 8.3543 | 0.50185 | 3 298.7 | 3 700.1 | 8.1354 | 0.40111 | 3 297.5 | 3 698.6 | 8.0310 |
| 700 | 0.89696 | 3 478.5 | 3 927.0 | 8.5977 | 0.56011 | 3 477.2 | 3 925.3 | 8.3794 | 0.44783 | 3 476.2 | 3 924.1 | 8.2755 |
| 800 | 0.98966 | 3 663.6 | 4 158.4 | 8.8240 | 0.61820 | 3 662.4 | 4 157.0 | 8.6061 | 0.49438 | 3 661.7 | 4 156.1 | 8.5024 |
| 900 | 1.08230 | 3 855.4 | 4 396.6 | 9.0362 | 0.67619 | 3 854.5 | 4 395.5 | 8.8185 | 0.54083 | 3 853.9 | 4 394.8 | 8.7150 |
| 1 000 | 1.17480 | 4 054.0 | 4 641.4 | 9.2364 | 0.73411 | 4 053.2 | 4 640.5 | 9.0189 | 0.58721 | 4 052.7 | 4 639.9 | 8.9155 |
| 1 100 | 1.26720 | 4 256.3 | 4 889.9 | 9.4224 | 0.79190 | 4 255.6 | 489.1 | 9.2050 | 0.63350 | 4 255.1 | 4 888.6 | 9.1017 |
| 1 200 | 1.35960 | 4 466.8 | 5 146.6 | 9.6029 | 0.84970 | 4 466.1 | 5 145.9 | 9.3855 | 0.67980 | 4 465.6 | 5 145.4 | 9.2822 |
| 1 300 | 1.45210 | 4 682.5 | 5 408.6 | 9.7749 | 0.90760 | 4 681.8 | 5 407.9 | 9.5575 | 0.72610 | 4 681.3 | 5 407.4 | 9.4543 |



| P = 16 bar | | T _{sat} = 201.37 °C | | P = 18 bar | | T _{sat} = 207.11 °C | | P = 20 bar | | T _{sat} = 212.38 °C | | | |
|------------------|--|------------------------------|-----------|------------|-------------|------------------------------|-----------|------------|-------------|------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| T (°C) | | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | | 0.12374 | 2 594.8 | 2 792.8 | 6.4199 | 0.11037 | 2 597.2 | 2 795.9 | 6.3775 | 0.09959 | 2 599.1 | 2 798.3 | 6.3390 |
| 225 | | 0.13293 | 2 645.1 | 2 857.8 | 6.5537 | 0.11678 | 2 637.0 | 2 847.2 | 6.4824 | 0.10381 | 2 628.5 | 2 836.1 | 6.4160 |
| 250 | | 0.14190 | 2 692.9 | 2 919.9 | 6.6753 | 0.12502 | 2 686.7 | 2 911.7 | 6.6087 | 0.11150 | 2 680.2 | 2 903.2 | 6.5475 |
| 300 | | 0.15866 | 2 781.6 | 3 035.4 | 6.8863 | 0.14025 | 2 777.4 | 3 029.9 | 6.8246 | 0.12551 | 2 773.2 | 3 024.2 | 6.7684 |
| 350 | | 0.17459 | 2 866.6 | 3 146.0 | 7.0713 | 0.15460 | 2 863.6 | 3 141.8 | 7.0120 | 0.13860 | 2 860.5 | 3 137.7 | 6.9583 |
| 400 | | 0.19007 | 2 950.7 | 3 254.9 | 7.2394 | 0.16849 | 2 948.3 | 3 251.6 | 7.1814 | 0.15121 | 2 945.9 | 3 248.3 | 7.1292 |
| 500 | | 0.22029 | 3 120.1 | 3 472.6 | 7.5409 | 0.19551 | 3 118.5 | 3 470.4 | 7.4845 | 0.17568 | 3 116.9 | 3 468.2 | 7.4337 |
| 600 | | 0.24999 | 3 293.9 | 3 693.9 | 7.8100 | 0.22200 | 3 292.7 | 3 692.3 | 7.7543 | 0.19961 | 3 291.5 | 3 690.7 | 7.7043 |
| 700 | | 0.27940 | 3 473.5 | 3 920.5 | 8.0557 | 0.24821 | 3 472.6 | 3 919.4 | 8.0040 | 0.22326 | 3 471.6 | 3 918.2 | 7.9509 |
| 800 | | 0.30865 | 3 659.5 | 4 153.3 | 8.2834 | 0.27426 | 3 658.8 | 4 152.4 | 8.2284 | 0.24674 | 3 658.0 | 4 151.5 | 8.1790 |
| 900 | | 0.33780 | 3 852.1 | 4 392.6 | 8.4965 | 0.30020 | 3 851.5 | 4 391.9 | 8.4416 | 0.27012 | 3 850.9 | 4 391.1 | 8.3925 |
| 1 000 | | 0.36687 | 4 051.2 | 4 638.2 | 8.6974 | 0.32606 | 4 050.7 | 4 637.6 | 8.6426 | 0.29342 | 4 050.2 | 4 637.0 | 8.5936 |
| 1 100 | | 0.39580 | 4 253.7 | 4 887.0 | 8.8837 | 0.35180 | 4 253.2 | 4 886.4 | 8.8290 | 0.31660 | 4 252.7 | 4 885.9 | 8.7800 |
| 1 200 | | 0.42480 | 4 464.2 | 5 143.9 | 9.0643 | 0.37760 | 4 463.7 | 5 143.4 | 9.0096 | 0.33980 | 4 459.3 | 5 142.9 | 8.9607 |
| 1 300 | | 0.45380 | 4 679.9 | 5 406.0 | 9.2364 | 0.40340 | 4 679.5 | 5 405.6 | 9.1818 | 0.36310 | 4 679.0 | 5 405.1 | 9.1329 |
| P = 25 bar | | T _{sat} = 223.95 °C | | P = 30 bar | | T _{sat} = 233.85 °C | | P = 35 bar | | T _{sat} = 242.86 °C | | | |
| T (°C) | | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | | 0.079949 | 2 602.1 | 2 801.9 | 6.2558 | 0.06666 | 2 603.2 | 2 803.2 | 6.1856 | 0.05706 | 2 602.9 | 2 802.6 | 6.1243 |
| 225 | | 0.080260 | 2 604.8 | 2 805.5 | 6.2629 | 0.07063 | 2 644.7 | 2 856.5 | 6.2893 | 0.05876 | 2 624.0 | 2 829.7 | 6.1764 |
| 250 | | 0.087053 | 2 663.3 | 2 880.9 | 6.4107 | 0.08118 | 2 750.8 | 2 994.3 | 6.5412 | 0.06845 | 2 738.8 | 2 978.4 | 6.4484 |
| 300 | | 0.098937 | 2 762.2 | 3 009.6 | 6.6459 | 0.09056 | 2 844.4 | 3 116.1 | 6.7449 | 0.07680 | 2 836.0 | 3 104.8 | 6.6601 |
| 350 | | 0.109790 | 2 852.5 | 3 127.0 | 6.8424 | 0.09938 | 2 933.5 | 3 231.7 | 6.9234 | 0.08456 | 2 927.2 | 3 223.2 | 6.8427 |
| 400 | | 0.120120 | 2 939.8 | 3 240.1 | 7.0170 | 0.10789 | 3 021.2 | 3 344.8 | 7.0856 | 0.09198 | 3 016.1 | 3 338.0 | 7.0074 |
| 450 | | 0.130150 | 3 026.2 | 3 351.6 | 7.1767 | 0.11620 | 3 108.6 | 3 457.2 | 7.2359 | 0.09920 | 3 104.5 | 3 451.6 | 7.1593 |
| 500 | | 0.139990 | 3 112.8 | 3 462.7 | 7.3254 | 0.13245 | 3 285.5 | 3 682.8 | 7.5103 | 0.11325 | 3 282.5 | 3 678.9 | 7.4356 |
| 600 | | 0.159310 | 3 288.5 | 3 686.8 | 7.5979 | 0.178350 | 3 469.3 | 3 915.2 | 7.8455 | 0.12702 | 3 464.7 | 3 909.3 | 7.6854 |
| 700 | | 0.197210 | 3 656.2 | 4 149.2 | 8.0743 | 0.215970 | 3 849.4 | 4 389.3 | 8.2882 | 0.14061 | 3 652.5 | 4 144.6 | 7.9156 |
| 800 | | 0.234660 | 4 048.9 | 4 635.6 | 8.4896 | 0.253200 | 4 251.5 | 4 884.6 | 8.6762 | 0.15410 | 3 842.4 | 4 385.7 | 8.1303 |
| 900 | | 0.271800 | 4 462.1 | 5 141.7 | 8.8569 | 0.290500 | 4 677.8 | 5 404.0 | 9.0291 | 0.16751 | 4 046.4 | 4 632.7 | 8.3324 |
| 1 000 | | | | | | | | | | 0.18080 | 4 249.2 | 4 881.9 | 8.5192 |
| 1 100 | | | | | | | | | | 0.19415 | 4 459.8 | 5 139.3 | 8.7000 |
| 1 200 | | | | | | | | | | 0.20749 | 4 675.5 | 5 401.7 | 8.8723 |



| T (°C) | P = 40 bar | | T_{sat} = 250.35 °C | | P = 45 bar | | T_{sat} = 257.44 °C | | P = 50 bar | | T_{sat} = 263.94 °C | |
|------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------|
| | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | 0.049776 | 2 601.7 | 2 800.8 | 6.0696 | 0.044059 | 2 599.7 | 2 797.9 | 6.0197 | 0.039446 | 2 597.0 | 2 794.2 | 5.9737 |
| 275 | 0.054607 | 2 668.9 | 2 887.3 | 6.2312 | 0.047333 | 2 651.3 | 2 864.3 | 6.1429 | 0.041439 | 2 632.3 | 2 839.5 | 6.0571 |
| 300 | 0.058870 | 2 726.2 | 2 961.7 | 6.3639 | 0.051378 | 2 713.0 | 2 944.2 | 6.2854 | 0.045346 | 2 699.0 | 2 925.7 | 6.2110 |
| 350 | 0.066473 | 2 827.4 | 3 093.3 | 6.5843 | 0.058423 | 2 818.6 | 3 081.5 | 6.5153 | 0.051969 | 2 809.5 | 3 069.3 | 6.4516 |
| 400 | 0.073431 | 2 920.7 | 3 214.5 | 6.7714 | 0.064772 | 2 914.2 | 3 205.6 | 6.7070 | 0.057837 | 2 907.5 | 3 196.7 | 6.6483 |
| 450 | 0.080043 | 3 011.0 | 3 331.2 | 6.9386 | 0.070756 | 3 005.8 | 3 324.2 | 6.8770 | 0.063323 | 3 000.6 | 3 317.2 | 6.8210 |
| 500 | 0.086442 | 3 100.3 | 3 446.0 | 7.0922 | 0.076521 | 3 096.0 | 3 440.4 | 7.0323 | 0.068583 | 3 091.7 | 3 434.7 | 6.9781 |
| 600 | 0.098859 | 3 279.4 | 3 674.9 | 7.3705 | 0.087662 | 3 276.4 | 3 670.9 | 7.3127 | 0.078704 | 3 273.3 | 3 666.8 | 7.2605 |
| 700 | 0.110980 | 3 462.4 | 3 906.3 | 7.6214 | 0.098500 | 3 460.0 | 3 903.3 | 7.5646 | 0.088518 | 3 457.7 | 3 900.3 | 7.5136 |
| 800 | 0.122920 | 3 650.6 | 4 142.3 | 7.8523 | 0.109160 | 3 648.8 | 4 140.0 | 7.7962 | 0.098158 | 3 646.9 | 4 137.7 | 7.7458 |
| 900 | 0.134760 | 3 844.8 | 4 383.9 | 8.0674 | 0.119720 | 3 843.3 | 4 382.1 | 8.0118 | 0.107690 | 3 841.8 | 4 380.2 | 7.9618 |
| 1 000 | 0.146520 | 4 045.1 | 4 631.2 | 8.2697 | 0.130200 | 4 043.9 | 4 629.8 | 8.2144 | 0.117150 | 4 042.6 | 4 628.3 | 8.1648 |
| 1 100 | 0.158170 | 4 248.0 | 4 880.6 | 8.5467 | 0.140560 | 4 264.8 | 4 879.3 | 8.4015 | 0.126480 | 4 245.6 | 4 878.0 | 8.3520 |
| 1 200 | 0.169870 | 4 458.6 | 5 128.1 | 8.6376 | 0.150980 | 4 457.5 | 5 136.9 | 8.5825 | 0.135870 | 4 456.3 | 5 135.7 | 8.5331 |
| 1 300 | 0.181560 | 4 674.3 | 5 400.5 | 8.8100 | 0.161390 | 4 673.1 | 5 399.4 | 8.7549 | 0.145260 | 4 672.0 | 5 398.2 | 8.7055 |
| T (°C) | P = 90 bar | | T_{sat} = 303.34 °C | | P = 100 bar | | T_{sat} = 311 °C | | P = 125 bar | | T_{sat} = 327.81 °C | |
| | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | 0.020490 | 2 558.5 | 2 742.9 | 5.6791 | 0.018030 | 2 545.2 | 2 725.5 | 5.6160 | 0.013496 | 2 505.6 | 2 674.3 | 5.4638 |
| 325 | 0.023284 | 2 647.6 | 2 857.1 | 5.8738 | 0.019877 | 2 611.6 | 2 810.3 | 5.7596 | | | | |
| 350 | 0.025816 | 2 724.9 | 2 957.9 | 6.0380 | 0.022440 | 2 699.6 | 2 924.0 | 5.9459 | 0.016138 | 2 624.8 | 2 826.6 | 5.7130 |
| 400 | 0.029960 | 2 849.2 | 3 118.8 | 6.2876 | 0.026436 | 2 833.1 | 3 097.4 | 6.2141 | 0.020030 | 2 789.6 | 3 040.0 | 6.0433 |
| 450 | 0.033524 | 2 956.3 | 3 258.0 | 6.4872 | 0.029782 | 2 944.5 | 3 242.3 | 6.4219 | 0.023019 | 2 913.7 | 3 201.4 | 6.2749 |
| 500 | 0.036793 | 3 056.3 | 3 387.4 | 6.6603 | 0.032811 | 3 047.0 | 3 375.1 | 6.5995 | 0.025630 | 3 023.2 | 3 343.6 | 6.4650 |
| 550 | 0.039885 | 3 153.0 | 3 512.0 | 6.8164 | 0.035654 | 3 145.4 | 3 502.0 | 6.7585 | 0.028033 | 3 126.1 | 3 476.5 | 6.6317 |
| 600 | 0.042861 | 3 248.4 | 3 634.1 | 6.9605 | 0.038378 | 3 242.0 | 3 625.8 | 6.9045 | 0.030306 | 3 225.8 | 3 604.6 | 6.7828 |
| 650 | 0.045755 | 3 343.4 | 3 755.2 | 7.0953 | 0.041018 | 3 337.9 | 3 748.1 | 7.0408 | 0.032490 | 3 324.1 | 3 730.2 | 6.9227 |
| 700 | 0.048589 | 3 438.8 | 3 876.1 | 7.2229 | 0.043597 | 3 434.0 | 3 870.0 | 7.1693 | 0.034612 | 3 422.0 | 3 854.6 | 7.0539 |
| 800 | 0.054132 | 3 632.0 | 4 119.1 | 7.4606 | 0.048629 | 3 628.2 | 4 114.5 | 7.4085 | 0.038724 | 3 616.7 | 4 102.8 | 7.2967 |
| 900 | 0.059562 | 3 829.6 | 4 365.7 | 7.6802 | 0.053547 | 3 826.5 | 4 362.0 | 7.6290 | 0.042720 | 3 818.9 | 4 350.9 | 7.5197 |
| 1 000 | 0.064918 | 4 032.4 | 4 616.7 | 7.8855 | 0.058390 | 4 029.9 | 4 613.8 | 7.8349 | 0.046641 | 4 023.5 | 4 606.5 | 7.7269 |
| 1 100 | 0.070160 | 4 236.3 | 4 867.7 | 8.0740 | 0.063120 | 4 234.0 | 4 865.1 | 8.0237 | 0.050450 | 4 228.2 | 4 858.8 | 7.9165 |
| 1 200 | 0.075440 | 4 447.2 | 5 126.2 | 8.2556 | 0.067890 | 4 444.9 | 5 123.8 | 8.2055 | 0.054300 | 4 439.3 | 5 118.0 | 8.0987 |
| 1 300 | 0.080720 | 4 662.7 | 5 389.2 | 8.4284 | 0.072650 | 4 460.5 | 5 387.0 | 8.3783 | 0.058130 | 4 654.8 | 5 381.4 | 8.2717 |



| T (°C) | P = 150 bar | | T _{sat} = 342.52 °C | | P = 175bar | | T _{sat} = 354.67 °C | | P = 200 bar | | T _{sat} = 365.75 °C | |
|------------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|------------------------|-----------|------------------------------|-------------|
| | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) | v (m ³ /kg) | u (kJ/kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg*K) |
| T _{sat} | 0.010338 | 2 455.6 | 2 610.7 | 5.3106 | 0.007929 | 2 390.5 | 2 529.3 | 5.1431 | 0.005865 | 2 295.0 | 2 412.3 | 4.9314 |
| 350 | 0.011481 | 2 520.9 | 2 693.1 | 5.4437 | | | | | | | | |
| 400 | 0.015671 | 2 740.6 | 2 975.7 | 5.8819 | 0.012463 | 2 684.3 | 2 902.4 | 5.7211 | 0.009950 | 2 617.9 | 2 816.9 | 5.5525 |
| 450 | 0.018477 | 2 880.7 | 3 157.9 | 6.1434 | 0.015204 | 2 845.4 | 3 111.0 | 6.0212 | 0.012721 | 2 807.2 | 3 061.7 | 5.9043 |
| 500 | 0.020827 | 2 998.4 | 3 310.8 | 6.3480 | 0.017385 | 2 972.4 | 3 276.7 | 6.2424 | 0.014793 | 2 945.3 | 3 241.2 | 6.1446 |
| 550 | 0.022945 | 3 106.2 | 3 450.4 | 6.5230 | 0.019305 | 3 085.8 | 3 423.6 | 6.4266 | 0.016571 | 3 064.7 | 3 396.1 | 6.3389 |
| 600 | 0.024921 | 3 209.3 | 3 583.1 | 6.6796 | 0.021073 | 3 192.5 | 3 561.3 | 6.5890 | 0.018185 | 3 175.3 | 3 539.0 | 6.5075 |
| 650 | 0.026804 | 3 310.1 | 3 712.1 | 6.8233 | 0.022742 | 3 295.8 | 3 693.8 | 6.7366 | 0.019695 | 3 281.4 | 3 675.3 | 6.6593 |
| 700 | 0.028621 | 3 409.8 | 3 839.1 | 6.9572 | 0.024342 | 3 397.5 | 3 823.5 | 6.8734 | 0.021133 | 3 385.1 | 3 807.8 | 6.7990 |
| 800 | 0.032121 | 3 609.2 | 4 091.1 | 7.2037 | 0.027405 | 3 599.7 | 4 079.3 | 7.1236 | 0.023869 | 3 590.1 | 4 067.5 | 7.0531 |
| 900 | 0.035503 | 3 811.2 | 4 343.7 | 7.4288 | 0.030348 | 3 803.4 | 4 334.5 | 7.3511 | 0.026483 | 3 795.7 | 4 325.4 | 7.2829 |
| 1 000 | 0.038808 | 4 017.1 | 4 599.2 | 7.6378 | 0.033215 | 4 010.7 | 4 592.0 | 7.5616 | 0.029020 | 4 004.3 | 4 584.7 | 7.4950 |
| 1 100 | 0.042000 | 4 222.6 | 4 952.6 | 7.8283 | 0.035970 | 4 216.9 | 4 846.4 | 7.7531 | 0.031450 | 4 211.3 | 4 840.2 | 7.6874 |
| 1 200 | 0.045523 | 4 433.8 | 5 112.3 | 8.0108 | 0.038760 | 4 428.3 | 5 106.6 | 7.9360 | 0.033910 | 4 422.8 | 5 101.0 | 7.8707 |
| 1 300 | 0.048450 | 4 649.1 | 5 376.0 | 8.1840 | 0.415400 | 4 646.5 | 5 370.5 | 8.1093 | 0.036360 | 4 638.0 | 5 360.1 | 8.0442 |

Propiedades de vapor de agua, Diagrama de Mollier y vapor sobrecalentado. Fuente: The American Society of Mechanical Engineer (1967) New York.



Factores K para accesorios

| | Diámetro nominal, pulgadas | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 1/2 | 3/4 | 1 | 1 1/2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8-10 | 12-16 | 12-24 |
| Válvula de compuerta (abierto) | 0.22 | 0.20 | 0.18 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.096 |
| Válvula de globo (abierto) | 9.2 | 8.5 | 7.8 | 7.1 | 6.5 | 6.1 | 5.8 | 5.4 | 5.1 | 4.8 | 4.4 | 4.1 |
| Codo estándar (atornillado) 90° | 0.80 | 0.75 | 0.69 | 0.63 | 0.57 | 0.54 | 0.51 | 0.48 | 0.45 | 0.42 | 0.39 | 0.36 |
| Codo estándar (atornillado) 45" | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.34 | 0.30 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.19 |
| "T" estándar (flujo recto) | 0.54 | 0.50 | 0.46 | 0.42 | 0.38 | 0.36 | 0.34 | 0.32 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.24 |
| "T" estándar (flujo cruzado) | 1.62 | 1.50 | 1.38 | 1.26 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.96 | 0.90 | 0.84 | 0.78 | 0.72 |

Factores K para codos bridados de 90°

| r/d | Tamaño nominal de la tubería, pulgadas | | | | | | | | | | |
|-----|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 ₁ | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8-10 | 12-16 | 18-24 |
| 1 | 0.54 | 0.50 | 0.46 | 0.38 | 0.36 | 0.34 | 0.32 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.24 |
| 3 | 0.32 | 0.30 | 0.276 | 0.228 | 0.216 | 0.204 | 0.192 | 0.018 | 0.168 | 0.156 | 0.144 |
| 6 | 0.459 | 0.425 | 0.391 | 0.32 | 0.31 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.24 | 0.22 | 0.20 |
| 10 | 0.81 | 0.75 | 0.69 | 0.57 | 0.54 | 0.51 | 0.48 | 0.45 | 0.42 | 0.39 | 0.36 |
| 14 | 1.03 | 0.95 | 0.87 | 0.72 | 0.68 | 0.65 | 0.61 | 0.57 | 0.53 | 0.49 | 0.46 |
| 20 | 1.35 | 1.25 | 1.15 | 0.95 | 0.9 | 0.85 | 0.80 | 0.75 | 0.70 | 0.65 | 0.60 |

Fuente: Shames H. I. (1995). Mecánica de Fluidos. McGRAW-HILL. 3 ed.



Rugosidades absolutas para varios materiales

| Material | Rugosidad absoluta ϵ (mm) |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Acero bridado | 0.9-9 |
| Acero comercial | 0.45 |
| Acero Galvanizado | 0.15 |
| Concreto con acabado normal | 1 - 3 |
| Concreto pre- esforzado | 0.25 - 0.4 |
| CCP | 0.12 |
| Hierro Forjado | 0.06 |
| Hierro Fundido | 0.15 |
| Hierro Dúctil | 0.25 |
| Hierro Galvanizado | 0.15 |
| Hierro dulce asfaltado | 0.12 |
| GRP | 0.030 |
| Polietileno | 0.007 |
| PVC | 0.0015 |



Especificaciones para tubos de acero comercial según norma ANSI

| $D_{Nominal}$ in | Cédula | $D_{Interior}$ in | $D_{Exterior}$ in |
|---------------------|--------|----------------------|----------------------|
| 3/4 | 40 | 0.824 | 1.050 |
| | 80 | 0.742 | |
| 1 | 40 | 1.049 | 1.315 |
| | 80 | 0.957 | |
| 1 1/4 | 40 | 1.38 | 1.660 |
| | 80 | 1.278 | |
| 1 1/2 | 40 | 1.61 | 1.900 |
| | 80 | 1.50 | |
| 2 | 40 | 2.067 | 2.375 |
| | 80 | 1.939 | |
| 2 1/2 | 40 | 2.469 | 2.875 |
| | 80 | 2.323 | |
| 3 | 40 | 3.068 | 3.500 |
| | 80 | 2.900 | |
| 3 1/2 | 40 | 3.548 | 4.000 |
| | 80 | 3.364 | |
| 4 | 40 | 4.026 | 4.500 |
| | 80 | 3.826 | |
| 5 | 40 | 5.047 | 5.563 |
| | 80 | 4.813 | |
| 6 | 40 | 6.065 | 6.625 |
| | 80 | 5.761 | |
| 8 | 40 | 7.981 | 8.625 |
| | 80 | 7.625 | |
| 10 | 40 | 10.020 | 10.750 |
| | 80 | 9.562 | |



Grupos adimensionales

| No. | Transferencia de masa | Transferencia de calor |
|-----|--|---|
| 1 | $\frac{C_A - C_{A1}}{C_{A2} - C_{A1}}$ | $\frac{t - t_1}{t_2 - t_1}$ |
| 2 | Número de Reynolds $Re = \frac{l u \rho}{\mu}$ | Número de Reynolds $Re = \frac{l u \rho}{\mu}$ |
| 3 | Número de Schmidt $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{v}{D_{AB}}$ | Número de Prandtl $Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{v}{\alpha}$ |
| 4 | Número de Sherwood $Sh = \frac{Fl}{c D_{AB}}, \frac{k_G \bar{p}_{B,M} R T l}{p_t D_{AB}},$ $\frac{k_c \bar{p}_{B,M} l}{p_t D_{AB}}, \frac{k'_c l}{D_{AB}}, \frac{k'_y R T l}{p_t D_{AB}}, \text{etc.}$ | Número de Nusselt $Nu = \frac{h l}{k}$ |
| 5 | Número de Grashof † $Gr_D = \frac{g l^3 \Delta \rho}{\rho} \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^2$ | Número de Grashof † $Gr_H = g l^3 \beta \Delta t \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^2$ |
| 6 | Número de Péclet $Pe_D = Re Sc = \frac{l u}{D_{AB}}$ | Número de Péclet $Pe_H = Re Pr = \frac{C_p l u \rho}{k} = \frac{l u}{\alpha}$ |
| 7 | Número de Stanton $St_D = \frac{Sh}{Re Sc} = \frac{Sh}{Pe_H} = \frac{F}{cu},$ $\frac{F}{G}, \frac{k_G \bar{p}_{B,M} M_{av}}{\rho u}, \text{etc.}$ | Número de Stanton $St_D = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{Nu}{Pe_H} = \frac{h}{C_p u \rho}$ |
| 8 | $j_D = St_D Sc^{2/3}$ | $j_H = St_H Pr^{2/3}$ |

† El número de Grashof aparece en los casos en que hay convección natural;
 $\Delta \rho = |\rho_1 - \rho_2|, \Delta t = |t_1 - t_2|$ en la misma fase

Fuente: Treybal, R. (s/f). Operaciones de Transferencia de Masa. 2^a ed. McGraw-Hill pp.77.



Teorema de Buckingham o teorema Π (Pi)

Establece que dada una variable física expresable mediante una ecuación en la que están involucradas n variables, y si dichas variables se expresan en términos de m magnitudes fundamentales (longitud (L), masa (M), tiempo (t), etc.), entonces, la ecuación original puede escribirse como otra ecuación equivalente con una serie de $n - m$ números adimensionales construidos con las variables originales.

Secuencia:

1. Elaborar un listado de las variables implicadas en el problema
2. Formular la expresión dimensional equivalente en cada una de las variables obtenidas en el punto anterior
3. Determinar las unidades dimensionales fundamentales usadas en las variables del problema, y basadas en el sistema internacional SI
4. Determinar el número de parámetros adimensionales independientes en los que se pueden agrupar las variables del problema
5. Generar los parámetros adimensionales Π
6. Comprobar que cada parámetro adimensional obtenido, efectivamente no tiene dimensiones
7. Fin



Transformada de Laplace

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$$

| $f(t)$ | $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$ | $f(t)$ | $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$ |
|---------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1) 1 | $\frac{1}{s}$ | 13) $t \cos(kt)$ | $\frac{s^2 - k^2}{(s^2 + k^2)^2}$ |
| 2) t | $\frac{1}{s^2}$ | 14) $1 - \cos(kt)$ | $\frac{k^2}{s(s^2 + k^2)}$ |
| 3) t^n | $\frac{n!}{s^{n+1}}$ | 15) $e^{at} f(t)$ | $F(s - a)$ |
| 4) $t^{1/2}$ | $\frac{\sqrt{\pi}}{2s^{3/2}}$ | 16) $t^n f(t)$ | $(-1) \frac{d^n(F(s))}{ds^n}$ |
| 5) $\sin(kt)$ | $\frac{k}{s^2 + k^2}$ | 17) $U(t - a)$ | $\frac{e^{-as}}{s}$ |
| 6) $\cos(kt)$ | $\frac{s}{s^2 + k^2}$ | 18) $f(t - a)U(t - a)$ | $e^{-as}F(s)$ |
| 7) $\sin^2(kt)$ | $\frac{2k^2}{s(s^2 + 4k^2)}$ | 19) $f(t)U(t - a)$ | $e^{-as}\mathcal{L}\{f(t + a)\}$ |
| 8) $\cos^2(kt)$ | $\frac{s^2 + 2k^2}{s(s^2 + 4k^2)}$ | 20) $f'(t)$ | $sF(s) - f(0)$ |
| 9) e^{at} | $\frac{1}{s - a}$ | 21) $f''(t)$ | $s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$ |
| 10) senh(kt) | $\frac{k}{s^2 + k^2}$ | 22) $\delta(t - t_0)$ | e^{-st_0} |
| 11) $\cosh(kt)$ | $\frac{s}{s^2 + k^2}$ | 23) $\int_0^t f(\tau) g(t - \tau) d\tau$ | $F(s)G(s)$ |
| 12) $t \sin(kt)$ | $\frac{2ks}{(s^2 + k^2)^2}$ | | |

Fuente: Stephanopoulos G. (1983) Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice. Pearson.



Factores de dimensionamiento de válvulas para flujo máximo de acuerdo al modelo de Masoneilan

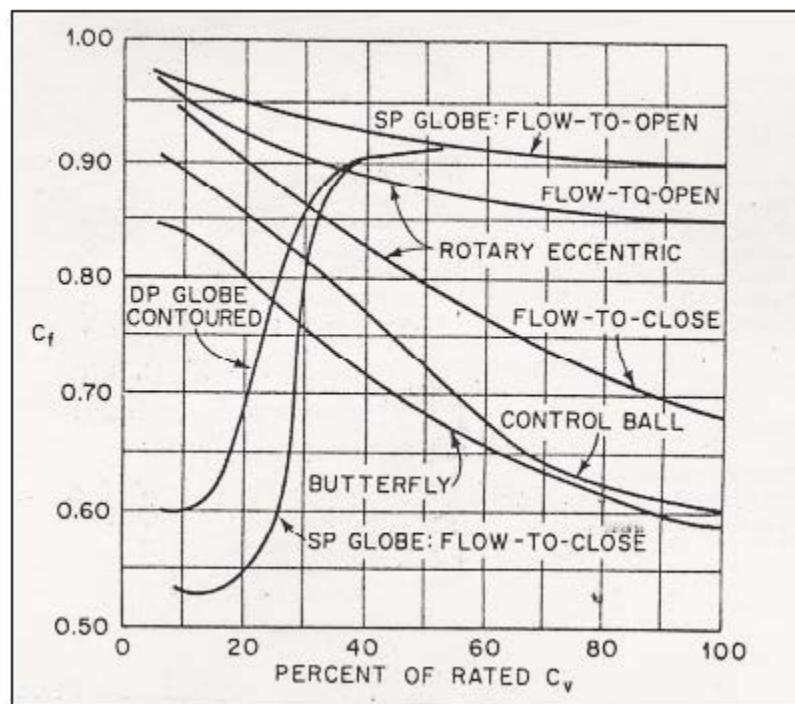
| Valve type | Trim size* | Flow to | Cf | K _c * | Cfr | D/d = 1.5 | | D/d = 2 | |
|---|------------|---------|------|------------------|-----------|-----------|-------|---------|-------|
| | | | | | D/d ≥ 1.5 | R | Cfr/R | R | Cfr/R |
| Single-port top-entry globe | A | Close | 0.85 | 0.58 | 0.81 | 0.96 | 0.84 | 0.94 | 0.86 |
| | | Open | 0.90 | 0.65 | 0.86 | 0.96 | 0.89 | 0.94 | 0.91 |
| | B | Close | 0.80 | 0.52 | 0.80 | 1.0 | 0.80 | 1.0 | 0.80 |
| | | Open | 0.90 | 0.65 | 0.90 | 1.0 | 0.90 | 1.0 | 0.90 |
| Single-port balanced quick-change Top-entry angle | A | Close | 0.90 | 0.65 | 0.86 | 0.96 | 0.89 | 0.94 | 0.91 |
| | B | Close | 0.90 | 0.65 | 0.90 | 1.0 | 0.90 | 1.0 | 0.90 |
| | A | Close | 0.81 | 0.53 | 0.78 | 0.96 | 0.81 | 0.94 | 0.82 |
| | | Open | 0.89 | 0.64 | 0.85 | 0.96 | 0.88 | 0.94 | 0.90 |
| | B | Close | 0.80 | 0.52 | 0.80 | 1.0 | 0.80 | 1.0 | 0.80 |
| | | Open | 0.90 | 0.65 | 0.90 | 1.0 | 0.90 | 1.0 | 0.90 |
| Streamlined angle | A | Close | 0.48 | 0.17 | 0.45 | 0.85 | 0.53 | 0.77 | 0.57 |
| | | Open | 0.90 | 0.65 | 0.84 | 0.95 | 0.89 | 0.91 | 0.91 |
| | B | Close | 0.55 | 0.23 | 0.54 | 1.0 | 0.54 | 1.0 | 0.54 |
| | | Open | 0.95 | 0.72 | 0.93 | 1.0 | 0.93 | 1.0 | 0.93 |
| Split body globe | A | Close | 0.80 | 0.51 | 0.77 | 0.96 | 0.80 | 0.94 | 0.81 |
| | | Open | 0.75 | 0.46 | 0.72 | 0.96 | 0.75 | 0.94 | 0.77 |
| | B | Close | 0.80 | 0.52 | 0.80 | 1.0 | 0.80 | 1.0 | 0.80 |
| | | Open | 0.90 | 0.65 | 0.89 | 1.0 | 0.89 | 1.0 | 0.90 |
| Top-and-bottom-guided double port | A | Cont. | 0.90 | 0.70 | 0.86 | 0.96 | 0.90 | 0.94 | 0.92 |
| | | V port | 0.98 | 0.80 | 0.94 | 0.96 | 0.98 | 0.94 | 1.0 |
| | B | Cont. | 0.80 | 0.31 | 0.80 | 1.0 | 0.80 | 1.0 | 0.80 |
| | | V port | 0.95 | 0.73 | 0.94 | 1.0 | 0.94 | 1.0 | 0.94 |
| Single-port eccentric rotating | A | Close | 0.68 | 0.35 | 0.65 | 0.95 | 0.68 | 0.92 | 0.71 |
| | | Open | 0.85 | 0.60 | 0.80 | 0.95 | 0.84 | 0.92 | 0.86 |
| | B | Close | 0.70 | 0.39 | 0.70 | 1.0 | 0.70 | 1.0 | 0.70 |
| | | Open | 0.88 | 0.62 | 0.87 | 1.0 | .87 | 1.0 | 0.87 |
| Butterfly | A | 60° | 0.68 | 0.35 | 0.63 | 0.91 | 0.69 | 0.85 | 0.73 |
| | | 90° | 0.58 | 0.25 | 0.51 | 0.77 | 0.66 | 0.67 | 0.74 |
| Control ball | A | | 0.60 | 0.24 | 0.55 | 0.87 | 0.63 | 0.80 | 0.68 |

* A, full capacity trim, orifice diameter 0.8 valve size; B, reduced capacity trim 50% of A and below.

Fuente: Miranda Medrano, J. A. Fundamentos de la Medición y Control de Procesos. Palibrio.



Factores de dimensionamiento de válvulas en función de la apertura de acuerdo al modelo de Masoneilan



Fuente: Miranda Medrano, J. A. Fundamentos de la Medición y Control de Procesos. Palibrio.

Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz

$$\begin{array}{c|ccccc|c|ccccc}
 s^n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & \alpha_1 & = & \frac{(a_{n-1} \cdot a_{n-2}) - (a_n \cdot a_{n-3})}{a_{n-1}} & \beta_1 & = & \frac{(a_1 \cdot a_{n-3}) - (a_{n-1} \cdot a_2)}{a_1} & \dots \\
 s^{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & & & & & & & \\
 s^{n-2} & a_1 & a_2 & a_3 & \dots & & & & & & & \\
 s^{n-3} & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \alpha_2 & = & \frac{(a_{n-1} \cdot a_{n-4}) - (a_n \cdot a_{n-5})}{a_{n-1}} & \beta_2 & = & \frac{(a_1 \cdot a_{n-5}) - (a_{n-1} \cdot a_3)}{a_1} & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & & & & & & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \alpha_3 & = & \frac{(a_{n-1} \cdot a_{n-6}) - (a_n \cdot a_{n-7})}{a_{n-1}} & \beta_3 & = & \frac{(a_1 \cdot a_{n-7}) - (a_{n-1} \cdot a_4)}{a_1} & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & & & & & & \\
 s^0 & \delta_1 & & & & : & : & : & : & : & & :
 \end{array}$$

Fuente: Miranda Medrano, J. A. Fundamentos de la Medición y Control de Procesos. Palibrio



Tabla de conversiones

| Dimensión | Métrico | Métrico/Inglés |
|--|---|---|
| Coeficiente de transferencia de calor | $1 \text{ W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C} = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ | $1 \text{ W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C} = 0.1761 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot {}^\circ\text{F}$ |
| Energía, calor, trabajo, energía interna, entalpía | $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$ $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$ | $1 \text{ kJ} = 0.9478 \text{ BTU}$ $1 \text{ BTU} = 1.0551 \text{ kJ}$ $= 3.9290 \times 10^{-4} \text{ hp.h}$ $= 5.4040 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3$ $= 778.169 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}$ $= 6.5850 \times 10^{21} \text{ eV}$ $1 \text{ BTU/lb}_m = 25\,037 \text{ ft}^2/\text{s}^2$ $= 2.326 \text{ kJ/kg}$ $1 \text{ kJ/kg} = 0.430 \text{ BTU/lb}_m$ $1 \text{ kWh} = 3\,412.14 \text{ BTU}$ |
| Flujo de calor | $1 \text{ W/cm}^2 = 10^4 \text{ W/m}^2$ | $1 \text{ W/m}^2 = 0.3171 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2$ |
| Fuerza | $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ $= 10^5 \text{ dina}$ $1 \text{ dina} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2$ $1 \text{ kg}_f = 9.8070 \text{ N}$ | $1 \text{ N} = 0.2248 \text{ lb}_f$ $1 \text{ lb}_f = 32.174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/s}^2$ $= 4.448 \text{ N}$ |
| Longitud | $1 \text{ m} = 10^6 \mu\text{m}$ | $1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$ $= 0.3048 \text{ m}$ $1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$ $1 \text{ m} = 39.370 \text{ in}$ $= 3.2808 \text{ ft}$ $= 1.0936 \text{ yd}$ $1 \text{ milla} = 5\,280 \text{ ft}$ $= 1.6093 \text{ km}$ |
| Masa | $1 \text{ t métrica} = 1\,000 \text{ kg}$ | $1 \text{ kg} = 2.2046 \text{ lb}_m$ $1 \text{ lb}_m = 0.4536 \text{ kg}$ $1 \text{ onza} = 28.3495 \text{ g}$ $1 \text{ slug} = 32.174 \text{ lb}_m$ $= 14.5939 \text{ kg}$ $1 \text{ t corta} = 907.1847 \text{ kg}$ |
| Potencia, velocidad de transferencia de calor | $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ $1 \text{ kW} = 1.341 \text{ hp}$ $1 \text{ hp} = 745.7 \text{ W}$ | $1 \text{ kW} = 3\,412.14 \text{ BTU/h}$ $= 737.56 \text{ lb}_f \cdot \text{ft/s}$ $1 \text{ hp} = 550 \text{ lb}_f \cdot \text{ft/s}$ $= 0.7068 \text{ BTU/s}$ $= 42.41 \text{ BTU/min}$ $= 2\,544.6 \text{ BTU/h}$ $= 0.7457 \text{ kW}$ $1 \text{ hp de caldera} = 33.475 \text{ BTU/h}$ $1 \text{ BTU/h} = 1.0551 \text{ kJ/h}$ $1 \text{ t de refrigeración} = 200 \text{ BTU/min}$ |

Fuente: Yunus A. Çengel & Michael A. Boles. (1996) Termodinámica. MacGraw-Hill

| Dimensión | Métrico | Métrico/Inglés |
|-----------------------|--|--|
| Calor específico | $1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ | $1 \text{ BTU/lb}_m \cdot ^\circ\text{F} = 4.1868 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ $1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 0.23885 \text{ BTU/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$ $= 0.23885 \text{ BTU/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ |
| Conductividad térmica | $1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} = 1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ | $1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} = 0.57782 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$ |
| Presión | $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} = 10^{-3} \text{ MPa}$ $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$ $= 1.01325 \text{ bar}$ $= 10.33 \text{ mca (metros de columna de agua)}$ $= 29.92 \text{ in Hg}$ $= 760 \text{ mm Hg a } 0^\circ\text{C}$ $= 1.03323 \text{ kg/cm}^2$ $1 \text{ mm Hg} = 0.1333 \text{ kPa}$ $= 1 \text{ torr}$ | $1 \text{ Pa} = 1.4504 \times 10^{-4} \text{ psia}$ $= 0.020886 \text{ lb}/\text{ft}^2$ $1 \text{ psi} = 144 \text{ lb}/\text{ft}^2$ $= 6.8948 \text{ kPa}$ $1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psia}$ $= 29.92 \text{ in Hg a } 30^\circ\text{F}$ $1 \text{ in Hg} = 3.387 \text{ kPa}$ |
| Temperatura | $T(\text{K}) = T(\text{°C}) + 273.15$ $\Delta T(\text{K}) = \Delta T(\text{°C})$ | $T(\text{°R}) = T(\text{°F}) + 459.67$ $T(\text{°F}) = 1.8 T(\text{°C}) + 32$ $T(\text{°R}) = 1.8 (T(\text{°C}) + 273.15)$ $T(\text{°C}) = 0.556 (T(\text{°R}) - 491.67)$ $\Delta T(\text{°F}) = \Delta T(\text{°R}) = 1.8 \Delta T(\text{K}) = 1.8 \Delta T(\text{°C})$ |
| Viscosidad | $1 \text{ poise} = 1 \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ $1 \text{ cp (centipoise)}$ $= 0.01 \text{ poise}$ $= 0.1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ $1 \text{ cSt (centistoke)}$ $= 10^{-2} \text{ St (stoke)}$ $= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ | |
| Volumen | $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$ $= 10^6 \text{ cm}^3 (\text{cc})$ $= 1000 \text{ dm}^3$ $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3$ | $1 \text{ m}^3 = 6.1024 \times 10^4 \text{ in}^3$ $= 35.315 \text{ ft}^3$ $= 264.17 \text{ gal (U.S.)}$ $1 \text{ gal(U.S.)} = 231 \text{ in}^3$ $= 3.7854 \text{ L}$ $1 \text{ fl onza} = 29.5735 \text{ cm}^3$ $= 0.0295735 \text{ L}$ $1 \text{ gal(U.S.)} = 128 \text{ fl onzas}$ |
| Volumen específico | $1 \text{ m}^3/\text{kg} = 1000 \text{ L/kg} = 1000 \text{ cm}^3/\text{g}$ | $1 \text{ m}^3/\text{kg} = 16.02 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ $1 \text{ ft}^3/\text{lb}_m = 0.062428 \text{ m}^3/\text{kg}$ |

Fuente: Yunus A. Çengel & Michael A. Boles. (1996) Termodinámica. MacGraw-Hill



Constantes físicas

| | |
|--|---|
| Aceleración de la gravedad estándar | $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ $= 32.174 \text{ ft/s}^2$ |
| Calor de fusión (h_{if}) y evaporación (H_{fg}) del agua a 1 atm | $h_{if} = 333.7 \text{ kJ/kg}$ $= 143.5 \text{ BTU/lb}_m$ $H_{fg} = 2\,256.5 \text{ kJ/kg}$ $= 970.3 \text{ BTU/lb}_m$ |
| Constante de Boltzmann | $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/molécula}$ |
| Constante de Stefan-Boltzmann | $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ $= 0.1714 \times 10^{-8} \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot {}^\circ\text{R}^4$ $= 1.355 \times 10^{-12} \text{ cal/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^4$ |
| Constante universal de los gases | $R = 8.31447 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ $= 0.082057 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}$ $= 8.31447 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{mol} \cdot \text{K}$ $= 0.0831447 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K}$ $= 82.057 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 / \text{gmol} \cdot \text{K}$ $= 1.9872 \text{ BTU/lbmol} \cdot {}^\circ\text{R}$ $= 1\,545.37 \text{ lb}_f \cdot \text{ft/lbmol} \cdot {}^\circ\text{R}$ $= 10.73 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3 / \text{lbgmol} \cdot {}^\circ\text{R}$ $= 1.9872 \text{ cal/gmol} \cdot \text{K}$ $= 21.9 \text{ in Hg} \cdot \text{ft}^3 / \text{lbgmol} \cdot {}^\circ\text{R}$ $= 0.7302 \text{ atm} \cdot \text{ft}^3 / \text{lbgmol} \cdot {}^\circ\text{R}$ |
| Factor de conversión gravitacional | $g_c = 32.1740 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/lbf} \cdot \text{s}^2$ $= 980.665 \text{ g}_m \cdot \text{cm/g}_f \cdot \text{s}^2$ |
| Presión atmosférica estándar | $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$ $= 1.01325 \text{ bar}$ $= 14.696 \text{ psia}$ $= 760 \text{ mm Hg (0 } {}^\circ\text{C)}$ $= 29.9213 \text{ in Hg (32 } {}^\circ\text{F)}$ $= 10.3323 \text{ m H}_2\text{O (4 } {}^\circ\text{C)}$ |
| Velocidad de la luz en el vacío | $c_o = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ $= 9.836 \times 10^8 \text{ ft/s}$ |
| Velocidad del sonido en aire seco a 0 °C y 1 atm | $c = 331.36 \text{ m/s}$ $= 1\,087 \text{ ft/s}$ |

Fuente: Yunus A. Çengel & Michael A. Boles. (1996) Termodinámica. MacGraw-Hill

Consejo Técnico

Representantes de Instituciones de Educación Superior

Dr. Enrique Michel Valdivia
**Consejo de Acreditación de la Enseñanza
de la Ingeniería, A.C.**

M.C. Josafat García Servin
Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Mtro. Junior Marcel Hernández Vidal
**Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey**

Mtra. Alma Delia Rojas Rodríguez
Universidad Anáhuac

Dra. Mónica María Alcalá Rodríguez
Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. José Fernando Orejel Pajarito
**Universidad Autónoma
de San Luis Potosí**

Mtra. María Andrea Silva Beard
Universidad Iberoamericana

Dra. Edelia Claudina Villareal Ibarra
Universidad Popular de la Chontalpa

I.Q. Marco Antonio Poblano Ordoñez
Universidad Tecnológica de México

Dr. Raúl Alejandro Luna Sánchez
Universidad Veracruzana

Dra. Florentina Zurita Martínez
Universidad de Guadalajara

Dra. Claudia Araceli Ruiz Mercado
Universidad Autónoma de Yucatán

Este Formulario es un instrumento de apoyo para quienes sustentarán el Examen General para el Egreso de la Licenciatura en Ingeniería Química (EGEL Plus IQUIM).

El Formulario para el sustentante es un documento cuyo contenido está sujeto a revisiones periódicas. Las posibles modificaciones atienden a los aportes y críticas que hagan los miembros de las comunidades académicas de instituciones de educación superior de nuestro país, los usuarios y, fundamentalmente, las orientaciones del Consejo Técnico del examen.

El Ceneval y el Consejo Técnico del EGEL Plus IQUIM agradecerán todos los comentarios que puedan enriquecer este material. Sírvase dirigirlos a:

Centro Nacional de Evaluación para la Educación Superior, A.C.

**Subdirección de Evaluación de Egreso
en Diseño, Ingenierías y Arquitectura**

Av. Camino al Desierto de los Leones (Altavista) 37,

Col. San Ángel, Álvaro Obregón,

C.P. 01000, Ciudad de México.

Tel: 55 53 22 92 00 ext. 5102

www.ceneval.edu.mx

abraham.maya@ceneval.edu.mx

El Centro Nacional de Evaluación para la Educación Superior es una asociación civil sin fines de lucro constituida formalmente el 28 de abril de 1994, como consta en la escritura pública número 87036 pasada ante la fe del notario 49 del Distrito Federal.

Sus órganos de gobierno son la Asamblea General, el Consejo Directivo y la Dirección General. Su máxima autoridad es la Asamblea General, cuya integración se presenta a continuación, según el sector al que pertenecen los asociados:

Asociaciones e instituciones educativas: Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior, A.C.; Federación de Instituciones Mexicanas Particulares de Educación Superior, A.C.; Instituto Politécnico Nacional; Tecnológico de Monterrey; Universidad Autónoma del Estado de México; Universidad Autónoma de San Luis Potosí; Universidad Autónoma de Yucatán; Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla; Universidad Tecnológica de México.

Asociaciones y colegios de profesionales: Barra Mexicana Colegio de Abogados, A.C.; Colegio Nacional de Actuarios, A.C.; Colegio Nacional de Psicólogos, A.C.; Federación de Colegios y Asociación de Médicos Veterinarios y Zootecnistas de México, A.C.; Instituto Mexicano de Contadores Públicos, A.C.

Organizaciones productivas y sociales: Academia de Ingeniería, A.C.; Academia Mexicana de Ciencias, A.C.; Academia Nacional de Medicina, A.C.; Fundación ICA, A.C.

Autoridades educativas gubernamentales: Secretaría de Educación Pública.

El Centro está inscrito desde el 10 de marzo de 1995 en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el número 506. Asimismo, es miembro de estas organizaciones: International Association for Educational Assessment; European Association of Institutional Research; Consortium for North American Higher Education Collaboration; Institutional Management for Higher Education de la OCDE.

