

300618

9
20



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA
incorporada a la U.N.A.M.

**ESTIMACION DE EFICIENCIAS DE SEPARACION
EN CALCULADORA PROGRAMABLE DE BOLSILLO**

Tesis Profesional

Que para obtener el Titulo de
INGENIERO QUIMICO

presenta

JUAN CARLOS HERRERO CAGIGAS

México, D. F.

1988

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

| | Pag. |
|--|------|
| Introducción | 1 |
| Capitulo 1: Generalidades: | |
| 1.01 Plato teórico | 6 |
| 1.02 Plato real | 6 |
| 1.03 Conceptos de la eficiencia en platos | 6 |
| 1.04 Eficiencia general de la columna | 7 |
| 1.05 Eficiencia del plato base vapor | 8 |
| 1.06 Eficiencia del plato base líquido | 9 |
| 1.07 Eficiencia puntual base vapor | 10 |
| 1.08 Eficiencia puntual base líquido | 10 |
| 1.09 Eficiencia de plato y de punto | 11 |
| 1.10 Eficiencia de Murphree en el plato | 12 |
| 1.11 Concepto de eficiencia con empaques | 13 |
| 1.12 Altura de una unidad de transferencia | 13 |
| 1.13 Altura equivalente a un plato teórico | 14 |
| 1.14 Predicción de la eficiencia en columnas | 16 |

Capítulo 2: Torres de platos:

| | | |
|---------|---|----|
| 2.01 | Introducción | 18 |
| 2.02 | Procedimiento de cálculo | 18 |
| 2.03 | Tabla 1 con sistemas y eficiencias | 20 |
| 2.04 | Métodos empíricos de predicción | 32 |
| 2.04.01 | Método de O'Connell | 32 |
| 2.05 | Métodos estadísticos de predicción | 36 |
| 2.05.01 | Método de MacFarland, Sigmund y VanWinkle | 36 |
| 2.06 | Métodos teóricos de predicción | 37 |
| 2.06.01 | Método A.I.Ch.E. | 39 |
| 2.07 | Programa para calcular la eficiencia propuesto por O'Connell | 49 |
| 2.07.01 | Explicación del programa | 51 |
| 2.08 | Programa para calcular la eficiencia propuesto por MacFarland, Sigmund y VanWinkle | 53 |
| 2.08.01 | Explicación del programa | 56 |
| 2.08.02 | Ejemplo | 57 |
| 2.09 | Programa para calcular la eficiencia propuesto por el A.I.Ch.E. | 58 |
| 2.09.01 | Explicación del programa | 71 |
| 2.09.02 | Ejemplo | 71 |

| | | |
|------|---------------------------------|----|
| 2.10 | Nomenclatura del capítulo | 73 |
|------|---------------------------------|----|

Capítulo 3: Columnas empacadas:

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.01 | Introducción | 78 |
| 3.02 | Procedimiento de cálculo | 78 |
| 3.03 | Tabla 2 con sistemas y alturas equivalentes a platos teóricos | 80 |
| 3.04 | Método de Bolles y Fair | 86 |
| 3.05 | Tabla 3 con valores para factores de empaque | 101 |
| 3.06 | Reglas de la experiencia | 104 |
| 3.07 | Programa para calcular la eficiencia propuesto por Bolles y Fair | 107 |
| 3.07.01 | Primera parte del programa | 108 |
| 3.07.02 | Cálculo de las figuras 5 y 9 para anillos Raschig de cerámica | 114 |
| 3.07.03 | Cálculo de las figuras 6 y 10 para anillos Raschig de metal | 124 |
| 3.07.04 | Cálculo de las figuras 7 y 11 para sillas Berl de cerámica | 136 |
| 3.07.05 | Cálculo de las figuras 8 y 12 para anillos Pall de metal | 144 |
| 3.07.06 | Parte final del programa | 155 |
| 3.07.07 | Explicación del programa | 160 |

| | | |
|---------|---------------------------------|-----|
| 3.07.08 | Ejemplo | 162 |
| 3.08 | Nomenclatura del capítulo | 164 |
| | Conclusión | 167 |
| | Bibliografía | 171 |

INTROUCCION

Por medio de esta tesis se dan varios métodos y conceptos acerca de la eficiencia en torres de platos y empacadas.

Es importante tener un método confiable para la obtención de las eficiencias en columnas pues esto trae como consecuencia ahorros importantes en equipos de destilación reduciendo el tamaño de este. Además los costos de la energía incitan a la reducción del tamaño del equipo y a que estos se vuelvan mas complejos, caros y eficientes.

Para obtener mejores diseños en la hidráulica de las columnas y en la transferencia de masa, se requieren métodos mejores para estimar la eficiencia de la torre. En esta tesis se dan las correlaciones mas consistentes y exactas que hay en la literatura para el cálculo de las eficiencias en columnas de destilación y absorción.

En el principio de este trabajo se dan varios conceptos teóricos que estan relacionados con el cálculo de las eficiencias en columnas, cada uno de estos conceptos presentan al lector un panorama general en el cálculo de las eficiencias en columnas.

Para hacer mas práctico y fácil el uso de esta tesis se incluyen los listados de los programas para el cálculo de las eficiencias asi como una explicación para cada programa; de este modo la persona que utilice los métodos que aqui se dan encontrara una forma fácil para efectuar los cálculos rapidamente y una fuente segura y digna de confianza para el cálculo de las eficiencias.

Dentro de este trabajo se dan dos tablas, una de ellas para torres de platos y la otra para columnas empacadas; en estas tablas se encuentran diferentes sistemas que trabajan con distintos tipos de platos y empaques, cada sistema tiene una o mas condiciones de operación y se dan para cada uno de estos la eficiencia que tiene la columna, estas tablas se realizarón estudiando el sistema en la misma industria, esto quiere decir que estas tablas provienen de la práctica.

Los métodos usados en el cálculo de las eficiencias para torres de platos son los propuestos por: O'Connell, MacFarland, Sigmund y VanWinkle y el del American Institute of Chemical Engineers; cada uno de estos métodos calculan la eficiencia por separado, se comparan los

resultados con la tabla correspondiente y se escoge el valor que sea mas conservador.

Cada uno de los métodos esta desglosado en pasos para que su aplicación sea más fácil.

El método utilizado para las columnas empacadas es el propuesto por Bolles y Fair, el cual también viene dividido por pasos para que su uso sea más fácil, además tenemos una tabla con diferentes sistemas y sus eficiencias, y se da un método extra que proviene directamente de la experiencia.

CAPITULO 1: GENERALIDADES

PLATO TEORICO

Un plato teórico, o ideal, es aquel en el cual la composición promedio de todo el gas que abandona el plato alcanza el equilibrio con la composición promedio de todo el líquido que abandona el plato.

PLATO REAL

Es aquel en el que la composición promedio de todo el gas que abandona el plato no alcanza el equilibrio con la composición promedio de todo el líquido que abandona el plato; esto es lo que realmente pasa en la práctica.

CONCEPTOS DE LA EFICIENCIA EN PLATOS

En cualquier operación de separación por transferencia de masa se hace necesario corregir esta por considerar que existe un completo mezclado, una composición uniforme y un perfecto equilibrio entre la fase líquida y la fase vapor en cada plato. Estas

condiciones son imposibles de obtener en las columnas y se hace necesario introducir un factor que exprese la relación entre un plato real y un plato ideal (en el cual si se dan las condiciones anteriores). Este factor es conocido como la eficiencia del plato.

La eficiencia de un plato para la transferencia de masa depende de tres conjuntos de parámetros de diseño:

- 1 -- El sistema: composición y propiedades.
- 2 -- Condiciones de flujo: velocidad de paso.
- 3 -- Geometría: tipo y dimensiones del plato.

Se tiene poco control sobre el primer conjunto pero se pueden modificar eficientemente los otros dos.

EFICIENCIA GENERAL DE LA COLUMNA

Es la más fácil de usar cuando se convierte de platos teóricos a platos reales. La eficiencia general de la columna o de la razón de platos teóricos a platos reales se abrevia como E_o y esta definida como:

$$E_o = N_t / N_a$$

donde:

N_t = número de platos teóricos para la columna, sin incluir el condensador, ni el rehervidor.

N_a = número de platos reales para la columna.

La eficiencia del plato se basa en la composición de una sola fase o corriente en cada etapa de la columna de separación. Por ejemplo, la eficiencia de Murphree en el plato puede ser expresada tanto como eficiencia base vapor o eficiencia base líquida, cualquiera de las dos que sea más conveniente.

EFICIENCIA DEL PLATO BASE VAPOR

Esta se abrevia como: E_{mv} y esta definida como:

$$E_{mv} = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n^* - Y_{n-1})$$

donde:

Y_{n-1} y Y_n = composición promedio del vapor que entra y sale del plato respectivamente.

Y_n^* = composición del vapor en equilibrio con el líquido de composición X_n que deja el plato.

EFICIENCIA DEL PLATO BASE LIQUIDO

Esta se abrevia como: E_{ml} y esta definida como:

$$E_{ml} = (X_{n+1} - X_n) / (X_{n+1} - X_n^*)$$

donde:

X_{n+1} y X_n = composición promedio del líquido que entra y sale del plato respectivamente.

X_n^* = composición del líquido en el plato en equilibrio con el vapor de composición Y_n que deja el plato.

La eficiencia puntual esta basada solamente en la composición en un solo punto del plato. Para obtener la eficiencia global del plato, se puede tomar y hacer un promedio de varios puntos diferentes del plato.

EFICIENCIA PUNTUAL BASE VAPOR

Esta se abrevia como: Eov y esta definida como:

$$E_{ov} = (\bar{Y}_n - \bar{Y}_{n-1}) / (\hat{Y}_n - \bar{Y}_{n-1})$$

donde:

\bar{Y}_{n-1} y \bar{Y}_n = composición del vapor que entra y sale del plato en el punto considerado.

\hat{Y}_n = composición del vapor en equilibrio con el líquido de composición \bar{X}_n en el plato en el punto considerado.

EFICIENCIA PUNTUAL BASE LIQUIDO

Esta se abrevia como: Eol y esta definida como:

$$E_{ol} = (\bar{X}_{n+1} - \bar{X}_n) / (\bar{X}_{n+1} - \hat{X}_n)$$

donde:

\bar{X}_{n+1} y \bar{X}_n = composición del líquido que entra y sale del plato en el punto considerado.

\bar{X}_n = composición del líquido en equilibrio con el vapor de composición \bar{Y}_n en el punto que ha sido considerado.

EFICIENCIAS DE PLATO Y DE PUNTO

Estas eficiencias están relacionadas entre sí por funciones complejas las cuales dependen del grado de mezclado del líquido que se encuentra en el plato. Si el líquido en el plato se encuentra perfectamente mezclado y tiene la misma composición que el líquido que deja el plato, las eficiencias puntuales base líquido y base vapor son numéricamente iguales entre sí y también con las eficiencias del plato.

La eficiencia puntual es difícil de medir y es menos conveniente de usar que la eficiencia general.

La relación entre la eficiencia general y la eficiencia del plato está definida como:

$$E_o = \ln [1 + E_{mv} (\lambda - 1)] / (\ln \lambda)]$$

donde:

$\lambda = m / (L / V)$ = relación de la pendiente de la curva de equilibrio con la pendiente de la línea de operación.

Si λ es igual a la unidad, la eficiencia general es igual a la eficiencia base vapor del plato. Pero λ es raramente constante y la eficiencia base vapor del plato es función de λ .

EFICIENCIAS DE MURPHREE EN EL PLATO

Esta eficiencia puede ser convertida de base vapor a base líquido y viceversa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$E_{mv} = E_{ml} / (E_{ml} + \lambda (1 - E_{ml}))$$

$$E_{ml} = E_{mv} \lambda / (1 + E_{mv} (\lambda - 1))$$

Si λ es igual a la unidad, E_{mv} es igual a E_{ml} ; si λ es grande, E_{mv} es menor que E_{ml} ; y si λ es pequeña, E_{mv} es

mayor que Eml.

Es conveniente, en la mayoría de los casos, convertir la eficiencia de punto Eov a la eficiencia de plato de Murphree Emv. Esto se debe a la mezcla incompleta; solo en pequeñas columnas de laboratorio y condiciones especiales, tiene probabilidades de ser válida la suposición de que Eov sea igual a Emv.

CONCEPTOS DE EFICIENCIAS CON EMPAQUES

Las columnas empacadas para el contacto gas-líquido se usan mucho para operaciones de absorción y, hasta un punto limitado, para la destilación. Por lo común, las columnas se empacan con material orientado en forma aleatoria; pero en algunos casos, se puede colocar cuidadosamente en sus posiciones.

ALTURA DE UNA UNIDAD DE TRANSFERENCIA

Esta se abrevia como HTU.

La HTU es una combinación del flujo y del coeficiente

de transferencia de masa que nos da una unidad de transferencia en la separación. La HTU se expresa como sigue:

$$(HTU)_{og} = V / (K_g a P A)$$

donde:

(HTU)_{og} = altura de una unidad de transferencia, donde los subfijos " o " y " g " se refieren a la transferencia total de masa con base a la fase gas.

a = área interfacial por unidad de volumen de empaque.

K_g = coeficiente de transferencia de masa general con base en la fase gas.

P = presión total.

V = flujo molar del vapor.

ALTURA EQUIVALENTE A UN PLATO TEORICO

Esta se abrevia como: HETP .

La HETP es la altura de empaque requerida para

ejecutar una separación igual a un plato teórico.

La HETP esta relacionada con la HTU a través de una linearización de la pendiente de la curva de equilibrio hasta la pendiente de la línea de operación y esta dada por:

$$HETP = (HTU)_{\log} \ln \lambda / (\lambda - 1)$$

λ variará a través del proceso de destilación, por lo tanto la HETP variará con respecto a la composición aunque la $(HTU)_{\log}$ permanezca constante. Sin embargo, se puede hacer necesario calcular un nuevo valor de la HETP para cada etapa de equilibrio.

Para una separación específica, la $(HTU)_{\log}$ será menor que la HETP si λ es mayor a la unidad y viceversa si λ es menor que uno. En algunos casos λ es igual a uno y la HETP es aproximadamente igual al $(HTU)_{\log}$. Esto es conveniente porque de esta manera el número de platos teóricos requeridos para la separación se pueden calcular por varios métodos como el diagrama de McCabe-Thiele que fue dado para columnas de platos.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA EN COLUMNAS

La eficiencia de la columna puede ser calculada de varias maneras:

- 1 -- Comparar instalaciones similares en las cuales se disponen de datos.
- 2 -- Extrapolar los datos de laboratorio o de plantas piloto.

Los dos puntos anteriores se basan en una información directa, pero si no se dispone de ésta se debe recurrir a los métodos de predicción que son:

- 3 -- Métodos empíricos o estadísticos: estos métodos dan directamente los valores de E_{oc} .
- 4 -- Métodos teóricos o semiteóricos de transferencia de masa: estos métodos implican la predicción de eficiencias individuales.

CAPITULO 2: TORRES DE PLATOS

TORRES DE PLATOS

En esta parte se emplearan métodos empíricos, estadísticos y teóricos para calcular la eficiencia general e individual en una columna. También se incluye una larga lista de datos de eficiencias para propósitos comparativos.

El método empírico utilizado es el método propuesto por O'Connell en 1946.

El método estadístico utilizado es el metodo de MacFarlan, Sigmund y VanWinkle de 1972.

El método teórico utilizado es el metodo propuesto por el A.I.Ch.E. en 1958.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

1 -- Estime la eficiencia por los tres métodos que son: el método de O'Connell, MacFarland, Sigmund y VanWinkle y por el propuesto por el American Institute of Chemical Engineers.

2 -- Deduzcase un margen de error para obtener un

factor de seguridad en los valores obtenidos.

3 -- Comparense los valores obtenidos con los valores que se dan en la tabla 1 para el sistema que sea igual o similar al que se esta manejando.

4 -- Seleccione el valor de la eficiencia que sea mas conservador o aquel que se acerque mas a los valores de la tabla 1.

T A B L A 1

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert., m | EcG % | Emv % | Eo % |
|------------------------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------|----------|----------|---------|
| Buble-cap | | | | | | | |
| Etanol / Agua | 0.46 | | | | | 98 | |
| | | | | | | 70 | 95 |
| | 0.11 | | | | | 64.6 | |
| | 0.46 | 101 | | | 85 | 110 | |
| | | | | | 81 | 95 | |
| | | | | 0.81 | | 85 | |
| | 0.48 | | | | | 99.8 | |
| | 0.15 | | | | | 80 | |
| | 0.196 | 101 | | | | | |
| Metilciclo- hexano / Tolueno | 0.11 | | | | | 64.6 | |
| | | | | | | | |
| Aire / Agua | 1.52 | | 290 | | | | 83 |
| Bióxido de carbono / Agua | 0.076 | | | | | 80 | 125 |
| | | | | | | | 100 |
| Ácido acético / Agua | 0.46 | 101 | | | | 65 | |
| | 0.59 | 58 | | | | 54 | |
| Deuterio / Hidrógeno | 0.027 | | 20 | | | 50 | 44 |
| | | | | | | | |
| Oxígeno / Nitrógeno | | | | | | | 76 |
| | | | | | | | |

| Sistema | Diam. col., m | Pres., kPa | Temp., K | Alt., vert., m | EoG % | Emv % | Ec % |
|--------------------------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------|----------------|----------------|---------|
| Acetona / Agua | 5.49 | | | | 91 83 | | |
| Dicloro etileno / Tolueno | | | | 0.032 | | 95 | |
| Azúcar / Agua | 1.52 | | | | | 80 | |
| CHCl ₃ / CCl ₄ | | | | | 90 | | |
| Amoníaco / Agua | 0.305 | 101 | 283 | | | 77 | |
| Metanol / Agua | 1.0 | | | | | 90 70 | |
| Acetona / Benceno | | | | | 79 | | |
| Metanol / Isopropanol / Agua | 0.45 | | | | 68 70 68 | 68 | |
| Acetona / Metanol/ Agua | 0.45 | | | | 60 60 80 | | |
| Estabilizador de gasolina | 1.44 | 1820 | | | 75 | 100 | |
| Benceno / Tolueno | 0.2 0.2 0.15 | | | | | 60 70 58 | |
| Anilina / Agua | 0.2 | | | | | 58 | |
| Nafta / Agua | 2.74 | | | | | 65 | |

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert., m | EoG % | Emv % | Eo % |
|----------------------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------|----------|----------|---------|
| Isopropanol / Agua | 0.45 | | | | | 78 | |
| Metanol / Isopropanol | 0.45 | | | | | 64 | |
| Acetona / Metanol | 0.45 | | | | | 61 | |
| Benceno / Tolueno / Xileno | 0.2 | | | | | 75 | |
| Nafta / Pineno / Anilina | 0.2 | | | | | 90 | |

=====
Sieve

| | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-----|-----|--|------|------|-----|
| Etanol / Agua | 0.076 | 101 | | | 45.5 | | |
| | 0.127 | | | | | 85 | |
| | 0.196 | 101 | | | | 90 | |
| | lab | | | | | 71.4 | 120 |
| Mctiletil- cetona / Agua | 0.08 | | | | 41 | | |
| Acetona / Agua | 0.05 | 101 | | | 25.5 | | |
| | 0.11 | | | | 43.5 | | |
| | 0.15 | | 373 | | | 60 | |
| Benceno / Agua | 0.05 | 101 | | | 9.6 | | |

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert., m | EcG % | Env % | Ec % |
|---------------------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------|------------|----------|--------------|
| Tolueno / Agua | 0.05 | 101 | | | 7.1 | | |
| nHeptano / Metilciclohexano | 0.04 | | | | | 77.6 | |
| nHeptano / Ciclohexano | 1.2 2.44 | 165 165 | | 0.05 0.05 | | | 85 75 |
| | 1.2 | 164 | | | | 90 | |
| Tolueno / Metilciclohexano | 0.15 | 101 27 | | | | | 54.6 55.5 |
| Metilciclo- hexano / Tolueno | 0.05 | 101 | | | | 88 | 91 |
| Propano / Butano | | | | | | | 100 |
| Bióxido de carbono / Agua | 0.08 | | | | | 80 | 125 100 |
| | 0.15 | 111 | 298 | | | 89.7 | |
| nOctano / Tolueno | 0.15 | 101 | | 0.025 | | | 38 |
| Aire / Agua / Amoniaco | 0.00 | | 298 | 0.08 0.03 | 85.7 70 | 96.4 | |
| | | | | | | 65 | 50 |
| Oxígeno / Agua / Amoniaco | 0.15 | | | | | 75 | |
| Amoniaco / Agua | 0.3 | 101 | 283 | | | 89 | |
| Metilisobutil- cetona / Agua | 0.08 | | 298 | 0.08 | 41.5 | 64 | |

| Sistema | Diam. col. m | Pres. l.Ps | Temp. l. | Alt., vert. m | EcG % | Env % | Ec % |
|--------------------------------|--------------------|---------------|-------------|---------------------|----------|----------|---------|
| Bicloro etileno / Tolueno | 0.05 | 101 | | | | | 75 |
| Metiletil- cetona / Tolueno | 0.15 | | | 0.05 | | | 88 |
| Aire / Etanol | | | | 0.1 | 90 | | |
| Aire / Propanol | | | | 0.03 | 77 | | |
| Metanol / CCl | 0.11 | | | | 25.7 | | |
| Metanol / Agua | 0.11 | | | | 56 | | |
| | 1.0 | | | | 79.2 | 93 | 90 |
| Acetona / CCl ₄ | 0.11 | | | | 50 | | |
| Isopropanol / Agua | | | | | | | 72.9 |
| Benceno / Tolueno | 0.127 | | | | | 75 | |
| | 10.7 | 101 | 353 | 0.08 | 76.5 | 80.5 | |
| | | | | 0.14 | | 80.5 | |
| | | | | | | 85.2 | |
| Benceno / Metanol | 0.18 | 690 | | 0.05 | 86.4 | 94.2 | 85 |
| Ciclohexano / Tolueno | 2.4 | 103 | | | | | 70 |
| Etilbenceno / Estireno | 0.5 | 13 | | 0.038 | | 75 | |

| Sistema | Diam. col. m | Pres. kPa | Temp. K | Alt., vert. m | EoG % | Env % | Eo % |
|-------------------------------------|--------------------|--------------|------------|---------------------|-----------------|----------|----------|
| Helio / Metil- isobutilcetona | | | | | 90 0.038 | | |
| Nitrógeno / Isobutanol | | | | | 80 | | |
| Nitrógeno / Ciclohexanol | | | | | 0.051 | 70 | |
| Acido acético / Agua | 0.46 | 101 | | | | 75 | |
| Benceno / Propanol | 0.46 | | | | | 58.6 | |
| Ciclohexano / nHeptano / Tolueno | 0.038 | | | | 78 110 73 | | |
| nHeptano / Tolueno | | | | 0.02 | | 45 62 | |
| nHeptano / Benceno | | | | 0.02 | | 55 68 | |
| CCl ₄ / Benceno | 0.032 | | | | | | 71 73 |
| Isobutano / nButano | | 2068 | | | | 110 | |
| Etanol / Agua / Furfural | | | | | | 80 | |

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert., m | EoG % | Emv % | Ec % |
|--|---------------------|---------------|-------------|----------------------|------------------|----------|---------|
| nHexano / Etanol / Metil- ciclopentano | 0.1 | 101 | 333 | | 70 70.3 71 | | |
| nHexano / Etanol / Metil- ciclopentano / Benceno | 0.1 | 101 | 333 | | 55 60 6 | | |
| Benceno / nPropanol | 0.46 0.03 | 101 101 | 366 366 | 0.08 | | 54 57 | |
| Tolueno / nPropanol | 0.46 0.03 | 101 101 | 366 366 | 0.08 | | 61 57 | 65 |
| Aire / Agua / Trietilenglicol | | 101 | 297 | 0.05 | | 62 | |

=====
APV-West

Metanol / Agua 1.0 81

=====
Kascade

Etanol / Agua 0.2 54.1
0.2 70

Metilciclo- 0.2 44.6
hexano / Tolueno 72

Oxígeno / Agua 0.2 84

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert., m | EoG % | Emv % | Eo % |
|---------|------------------|------------|----------|-------------------|-------|-------|------|
|---------|------------------|------------|----------|-------------------|-------|-------|------|

Tunnel

| | | | | | | | |
|------------------------------------|-----|-----|-----|--|--|----|--|
| Furfural / Isobutano & Butileno | 4.0 | 593 | 318 | | | 25 | |
| Furfural / nButano & Butileno | 4.0 | 593 | 318 | | | 25 | |

Turbogrid

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|----------------|-----|-----|--|----------------|----|
| Amoniaco / Agua | 0.3 | 101 | 283 | | | 75 | |
| Etanol / Agua | | 0.24 101 | | | | 85 | 85 |
| Metanol / Agua | | 0.1 pequeno | 101 | 298 | | 87 95 86 | |
| Metanol / Isopropanol / Agua | | 0.15 | | | | 66.4 | |
| Metanol / Isopropanol | | pequeno | | | | 65 | |

V-Grid

| | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|--|----|----|
| Aire / Agua / Amoniaco | | | | | | 70 | 60 |
|---------------------------|--|--|--|--|--|----|----|

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., m | EoG vert., % | Emv % | Eo % |
|---------|------------------|---------------|-------------|------------|--------------------|----------|---------|
|---------|------------------|---------------|-------------|------------|--------------------|----------|---------|

Combinacion de valve y sieve

| | | | | | | | |
|-----------------------------|------|----|--|--|----|--|----|
| Benceno / Propanol | 0.46 | | | | 32 | | |
| Etilenbenceno / Estireno | | 13 | | | | | 80 |

Wyatt Perfavalve

| | | | | | | | |
|-----------------------|------|--|--|--|--|------|--|
| Propanol / Tolueno | 0.46 | | | | | 76.7 | |
| Propanol / Benceno | 0.46 | | | | | 55.5 | |

Valve

| | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|--|--|--|--|----|----|
| Benceno / Tolueno / Xileno | 2.43 | | | | | 69 | |
| Etanol / Agua | 0.032 0.06 | | | | | 56 | 70 |
| nPropanol / Benceno | 0.46 | | | | | 73 | |
| nPropanol / Tolueno | 0.46 | | | | | 51 | |

| Sistema | Diam. col. m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert. m | EoG % | Emv % | Eo % |
|--|--------------------|---------------|-------------|---------------------|----------|----------|---------|
| Etilbenceno / Estireno | 0.5 | 13 | | | | 85 | |
| Benceno / C ₆ aromáticos | 2.43 | | | | 44 66 | | 88 |
| ===== | | | | | | | |
| Round valve | | | | | | | |
| Etanol / Agua | 0.196 | 101 | | | | 92 | |
| ===== | | | | | | | |
| L-Type valve | | | | | | | |
| Etanol / Agua | 0.196 | 101 | | | | 68 | |
| ===== | | | | | | | |
| Nutter valve | | | | | | | |
| C ₆ / C ₄ | | 165 | | | | | 96 |
| iC ₄ / nC ₄ | | 1131 | | | | | 121 |
| Propanol / Benceno | 0.5 | | | | | 63.8 | |
| Propanol / Tolueno | 0.5 | | 303 | | | 75.3 | |
| Ciclohexano / Heptano | 1.2 | | | | | | 96 |

| Sistema | Diam. col., m | Pres., kPa | Temp., l. | Alt., vert., m | ErG % | Emv % | Eo % |
|---------|------------------|---------------|--------------|----------------------|----------|----------|---------|
|---------|------------------|---------------|--------------|----------------------|----------|----------|---------|

Rock valve

| | | | | | | | |
|----------------------------------|------|----|-----|------|--|----|------|
| Ciclohexano / Heptano | 1.2 | | | | | | 93.8 |
| Benceno / Tolueno / Xileno | 2.43 | 92 | 346 | 0.08 | | 48 | |

Glitch

| | | | | | | | |
|---------------------------|------------|------|--|------|--|------|------|
| nButano / Isobutano | 1.3 | 1138 | | 0.05 | | | 122 |
| Ciclohexano / nHeptano | 1.3 1.2 | 165 | | 0.05 | | 99.5 | 97 |
| Metanol / Agua | 0.1 | 101 | | 0.05 | | 88 | alta |

Riple

| | | | | | | | |
|--------------------|-----|-----|--|--|--|----|----|
| Metanol / Agua | 1.0 | | | | | 73 | |
| Amoníaco / Agua | 0.2 | 101 | | | | 82 | |
| Gasolina ligera | 2.0 | | | | | | 48 |

| Sistema | Diam. col., m | Pres., KPa | Temp., K | Alt., vert., m | EoG % | Emv % | Eo % |
|----------------------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------|----------|----------|---------|
| ----- | | | | | | | |
| Uniflex | | | | | | | |
| Metanol / Agua | 1.0 | | | | | 87 | |
| ----- | | | | | | | |
| Baffle | | | | | | | |
| Tolueno / Metilciclohexano | | 101 | | | | 87 | |
| ----- | | | | | | | |
| Angle | | | | | | | |
| Metanol / Agua | | 101 | | | | | 70 |
| ----- | | | | | | | |
| Crossflow plate | | | | | | | |
| Benceno / Tolueno | | | | | | 60 | |
| Etanol / Agua | | | | | | 70 | |
| ----- | | | | | | | |
| Jet | | | | | | | |
| Aire / Agua / Trietilenglicol | | 101 | 297 | 0.05 | | 65 | |
| Metiletil- cetona / Tolueno | 0.15 | | | 0.03 | | | 93 |

MÉTODOS EMPÍRICOS DE PREDICCIÓN

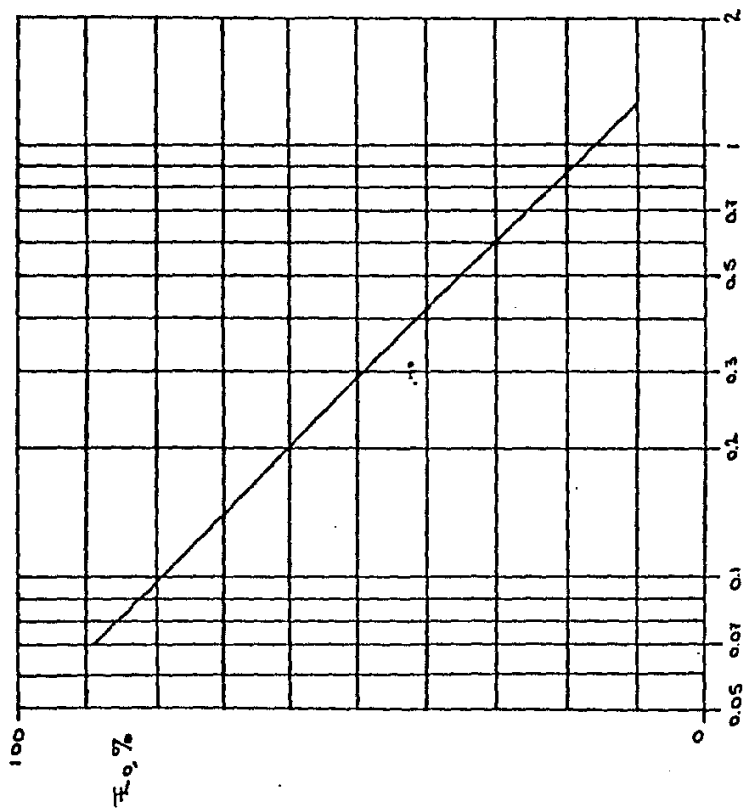
Dos de las correlaciones empíricas que se han llegado a utilizar con mucha amplitud son las de Drickamer y Bradford y una modificación de ella hecha por O'Connell.

La correlación de Drickamer y Bradford se muestra en la figura 1. Se basa en datos de la eficiencia general (E_o) para ochenta y cuatro columnas de refinería. Se destina solo a las separaciones de hidrocarburos en columnas de platos de cachucha.

El valor de la abscisa es un promedio de la viscosidad molar, basado en las condiciones prevalcientes y la composición de la alimentación. Se debe tener cuidado para no utilizar la correlación fuera del intervalo de aplicaciones indicado.

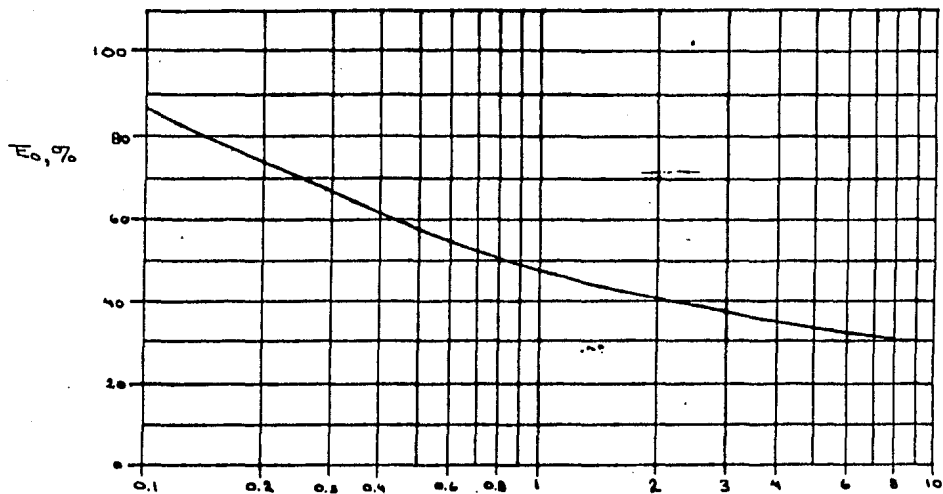
Para poder incluir materiales distintos de los hidrocarburos y sistemas de alta volatilidad relativa, O'Connell modificó la correlación de Drickamer y Bradford, como se muestra en la figura 2. La viscosidad de la alimentación y la volatilidad relativa se evalúan con el promedio aritmético de las temperaturas de la parte

superior e inferior de la columna.



Viscosidad y efecto de la concentración, en solución (a la temperatura promedio de la torre).

Fig. 1. Correlación de Brickner-Bradford.



$\alpha \mu$, volatilidad relativa del componente clave por la viscosidad de la alimentación, en centipoises (a las condiciones promedio de la columna).

MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE PREDICCIÓN

Es posible correlacionar la eficiencia como función de muchas variables que tienen probabilidad de influir en ésta. Una de esas correlaciones la señalaron MacFarlan, Sigmund y VanWinkle. Los datos obtenidos están dentro del rango normal de operación, esto es arriba del punto de lloriqueo y por debajo del punto de inundación.

La eficiencia del plato de Murphree base vapor se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{mv} = 6.8 (NRe_{NSc})^{0.1} (NDg_{NSc})^{0.16}$$

El promedio de la desviación absoluta con respecto a los valores experimentales se encontró que era de más-menos 10.6 %. Los grupos adimensionales usados en la correlación son los siguientes:

Número de Reynolds modificado:

$$NRe = \frac{hw U_{vs} \rho_v}{\mu_l F_a} = \frac{hw G}{\mu_l F_a}$$

Número líquido de Schmidt:

$$NSc = \frac{ml}{\rho l D_{12}}$$

Número de la tensión superficial:

$$NDg = \frac{\sigma l}{m l U_{vs}}$$

MÉTODOS TEÓRICOS DE PREDICCIÓN

El método para abordar el equilibrio en un plato se puede definir como la relación del cambio real de la composición del gas al pasar por el plato al cambio que se producirá, si el gas alcanzara un estado de equilibrio con el líquido. Si se toma en cuenta un punto sobre el plato, n , esta definición nos lleva a la eficiencia de punto:

$$E_{ov} = \frac{\bar{y}_n - \bar{y}_{n-1}}{\bar{y}_n^* - \bar{y}_{n-1}} \text{ punto}$$

en donde \bar{y}_n^* es la concentración del gas en equilibrio con

la concentración del líquido en el punto. Esta eficiencia no puede sobrepasar la unidad (100 %). Si hay gradientes de concentración de líquido en el plato (o sea, si el líquido del plato no está completamente mezclado), entonces, \bar{Y}_n variará y E_{ov} puede variar de un punto a otro del plato. Se debe observar que es posible expresar una definición análoga de la eficiencia sobre la base de las concentraciones de líquido.

Para el plato completo y para concentraciones de gases, se utiliza la eficiencia de Murphree para el vapor:

$$E_{mv} = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{\bar{Y}_n - Y_{n-1}} \text{ plato}$$

en donde \bar{Y}_n es la concentración de gas en equilibrio con la concentración del líquido que sale del plato (que fluye a la bajante, para un plato de flujo transversal).

Debido a los gradientes de concentraciones en el líquido, E_{mv} puede sobrepasar el 100 %.

El método teórico mejor establecido para la predicción de E_o es el del A.I.Ch.E..

METODO A.I.Ch.E.

Se basa en la predicción secuencial de la eficiencia de punto, la eficiencia de Murphree y la eficiencia general de la columna:

$$E_{ov} \text{ ----} \rightarrow E_{mv} \text{ ----} \rightarrow E_o$$

con una corrección adecuada de E_{mv} debida al arrastre.

El modelo A.I.Ch.E. es la base para el desarrollo que sigue:

El modelo consiste en fijar el diseño del plato y calcular o fijar las variables de operación y las variables del sistema. Las variables son: presión total, temperatura del plato, carga total de vapor, carga total de líquido, densidades de vapor y líquido y tensión superficial del líquido.

El método propuesto por el A.I.Ch.E. demostró tener una exactitud del 90 %.

El procedimiento de cálculo para el método propuesto por el A.I.Ch.E. es el siguiente:

1 -- Calcúlese la carga de vapor " Qv " y la carga de líquido " Ql " en metros cúbicos por segundo.

2 -- Determine la velocidad del vapor basada en el área activa en metros por segundo.

$$Uva = \frac{Qv}{Aa}$$

3 -- Calcúlese Fva:

$$Fva = \frac{Uva}{0.3048} \left[\frac{pv}{16.0185} \right]^{0.5}$$

4 -- Calcúlese el gasto de flujo de líquido por anchura de trayectoria de flujo en el plato:

$$Ql / Wa$$

5 -- Calcule el factor de absorción:

$$A = \frac{m Gm}{Lm} = \frac{m Qv pv Ml}{Ql pl Mv}$$

6 -- Calcúlese la altura de la espuma:

$$h_f = 2.53 F_{va}^2 + 74.41 h_w - 1.6$$

7 -- Calcúlese la altura de claro del líquido:

$$h_c = \frac{103 + 464.57 h_w - 40.5 F_{va} + 6038.59 Q_l / W_a}{p_l / 16.0185}$$

8 -- Calcúlese el tiempo de residencia del líquido:

$$Q_l = \frac{0.95 h_c A_a}{Q_l}$$

9 -- Determine el número de unidades de transferencia con base en la fase líquida:

$$N_l = 103 (38750.078 Q_l)^{0.8} (0.26 F_{va} + 0.15) Q_l$$

10 -- Calcúlese el número de unidades de transferencia con base en la fase gas:

$$N_g = [p_v D_v / m_v]^{0.5} [0.776 + 4.57 h_w + 0.29 F_{va} + 104.84 Q_1 / W_a + 7.874 \Delta]$$

11 - Evalúese la eficiencia general con base en la fase gas: E_{OG} :

$$-\log (1 - E_{OG}) = 0.434 \frac{N_1 N_g}{N_1 + \sqrt{N_g}}$$

12 -- Determine el por ciento de resistencia de la fase líquida:

$$\% R_1 = \frac{\lambda N_g}{N_1 + \lambda N_g} 100$$

13 -- Determine el coeficiente de difusión turbulenta:

$$De = [1 + 0.044 ((d_c / 0.0254) - 3)]^2 [0.0124 + 0.591 h_w + 0.056 U_{va} + 12.078 Q_1 / W_a]^2$$

donde:

$d_c = 0.0762$ metros aproximadamente para operaciones con platos tipo válvula.

14 -- Evalúe el número de Peclet:

$$Pe = \frac{(Zl / 0.0729)^2}{De \cdot \theta l}$$

15 -- Evalúe el término " λEoG " para que así se pueda utilizar la figura 3 para determinar Emv / EoG .

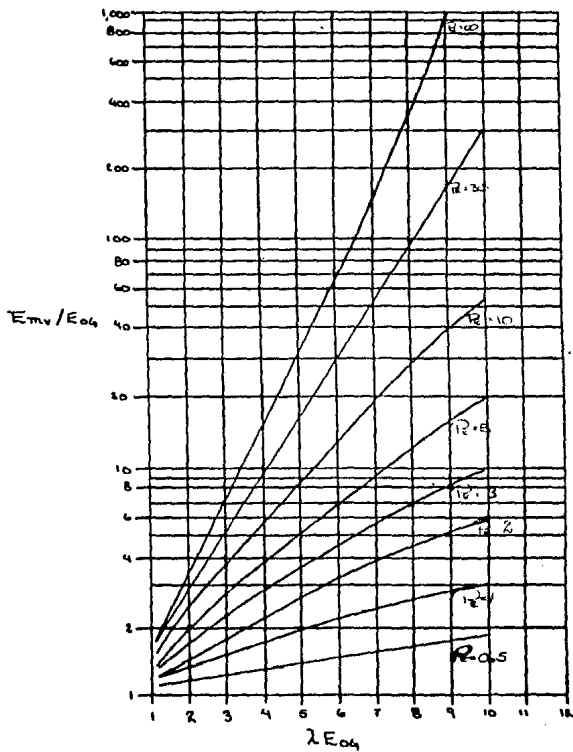


Fig. 3. Curva de mezclado, usada en el paso 15.

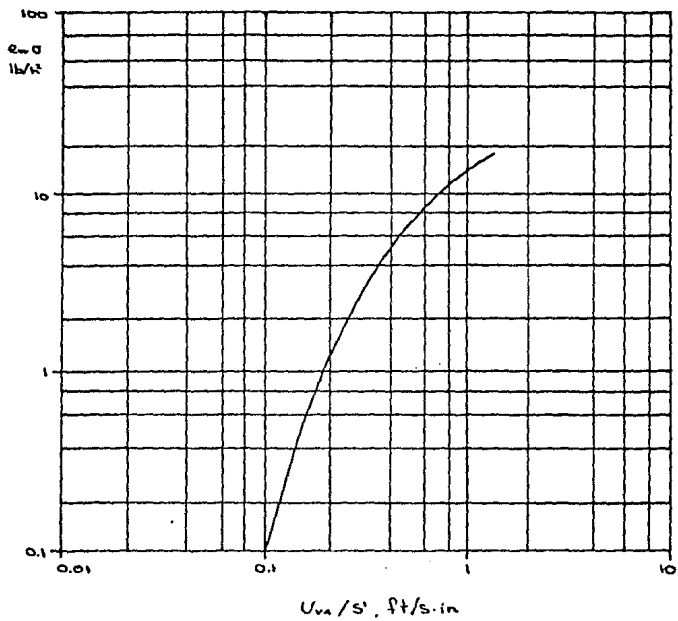
16 -- Evaluate Emv.

17 -- Calcule el espaciamiento efectivo entre platos:

$$S' = S - 0.0254 hf$$

18 -- Usando el valor de Uva / S', determine $ew\sigma$ de la figura 4.

Fig. 4. Relación de arrastre, usada en el paso 18.



19 -- Calcúlese la fracción neta de líquido
arrastrado:

$$r_e = \frac{449 e_w Q_v p_v}{Q_l p_l}$$

20 -- Determinese la eficiencia del plato mojado:

$$E_w = \frac{E_{mv}}{1 + r_e E_{mv}}$$

21 -- Determinese la eficiencia general de la
columna:

$$E_o = \frac{\log [1 + E_w (\lambda - 1)]}{\log \lambda}$$

A continuación se dan los programas para calcular las eficiencias por medio de la calculadora Hp-41.

PROGRAMA POR EL METODO DE O'CONNELL

01 LBL "000"
02 *ALFA =?"
03 PPOMPT
04 STO 01 _____ α
05 *KA =?"
06 PPOMPT
07 ST* 01 _____ *Viscosidad * α*
08 RCL 01
09 -.2411552546
10 Y1X
11 49.05891567
12 *
13 *E= *
14 RCL X
15 *F Z"
16 RVIEW
17 END

| | |
|-----------|---|
| Incognita | Nomenclatura en la tesis |
| ALFA | volatilidad relativa del componente clave. |
| MA | viscosidad de la alimentación. |
| E | E ₀ |

EXPLICACION DEL PROGRAMA

Para este programa se vio que la ecuación $y = a X^b$ se ajusta en un 99.68 % a la curva en la gráfica de O'Connell, donde " y " es la eficiencia, " X " es el producto de la volatilidad por la viscosidad, " a " es una constante igual a 42.05091567 y " b " es otra constante igual a -0.2411552546.

El programa funcionará con el comando " run/stop " (R/S), esto es, se pregunta la volatilidad en la calculadora como " ALFA =? " se teclea el valor de la volatilidad y despues la tecla " R/S ", posteriormentepregunta la viscosidad como " MA =? ", se teclea el valor de la viscosidad en las unidades especificas y despues la

tecla " R:G ", hecho esto la eficiencia aparecera en la pantalla como " E= % ", y será la eficiencia general.

PROGRAMA POR EL METODO DE MACFARLAND, SIGMUND Y VANWINKLE

01 *LEL *MSV*
 02 *HW =?*" h_w
 03 PROMPT
 04 STO 01
 05 *G =?*" $h_w G$
 06 PROMPT
 07 ST* 01
 08 *ML =?*" μ_1
 09 PROMPT
 10 STO 02
 11 1/X
 12 ST* 01 $h_w G / \mu_1$
 13 STO 03 $1/\mu_1$
 14 *FA =?*" $\frac{h_w G}{\mu_1 F_0} = \lambda_{ce}$
 15 PROMPT
 16 ST/ 01
 17 *DL =?*" μ_1 / ρ_1
 18 PROMPT
 19 ST/ 02
 20 *DLK =?*" $\mu_1 / \rho_1 D_{en} = \lambda_{ce}$
 21 PROMPT
 22 ST/ 02
 23 *TSL =?*" σ_1 / μ_1
 24 PROMPT
 25 ST* 03
 26 *UVS =?*" $\sigma_1 / \mu_1 U_{vs} = \lambda_{og}$
 27 PROMPT
 28 ST/ 03
 29 RCL 01
 30 RCL 02
 31 *
 32 .1
 33 Y↑X
 34 RCL 03
 35 RCL 02
 36 *
 37 .115
 38 Y↑X
 39 *
 40 6.8
 41 *

42 *E= *
43 APCL X
44 *F Z*
45 AVLEM
46 END

Incógnita

Nomenclatura en la tesis

| | |
|-----|-----|
| HW | hw |
| G | G |
| ML | ml |
| FA | FA |
| dl | pl |
| DLK | Dlk |
| TSL | dl |
| UYS | Uys |
| E | Emv |

EXPLICACION DEL PROGRAMA

El programa funcionará con el comando run/stop (R/S), preguntará cada incógnita que necesite, se teclarea el valor en las unidades requeridas y se tecleará la tecla " R/S " para que corra el programa; la eficiencia la dara como " E= % " y será la eficiencia de Murphree.

EJEMPLO

A continuación se dan los siguientes datos para utilizarlos en el programa para fines comparativos y como un ejercicio:

Altura del vertedero = 0.06 m

Masa velocidad = 1.617 Kg / (s m²)

Viscosidad del líquido = 2 x 10⁻³ Kg / (m s)

Area fraccional libre = 0.3207

Densidad del líquido = 996 Kg / m³

Difusividad del clave ligero = 2.421 x 10⁻⁵ m² / s

Tensión superficial = 68 x 10⁻³ Kg / s²

Velocidad superficial del vapor = 2.4858 m / s

Los datos anteriores son los que deben ser introducidos al programa y como resultado nos dará que la eficiencia es igual a 64.3666 %.

PROGRAMA POR EL METODO A.I.C.H.E.

01 *LEL *AIC*
 02 *QV =?*" Q_v
 03 PROMPT
 04 STO 01 Q_v
 05 STO 02 Q_v
 06 STO 03 Q_v
 07 STO 04 Q_v
 08 *AA =?*" Q_v
 09 PROMPT
 10 ST/ 01 $Q_v / A_2 = U_{v2}$
 11 ST/ 02 $Q_v / A_2 = U_{v2}$
 12 STO 05 A_2
 13 *dV =?*" A_2
 14 PROMPT
 15 STO 06 p_v
 16 ST* 03 $Q_v p_v$
 17 ST* 04 $Q_v p_v$
 18 SORT
 19 1.219904646
 20 /
 21 ST* 01 F_{v2}
 22 *QL =?*" F_{v2}
 23 PROMPT
 24 ST/ 03 $Q_v p_v / Q_2$
 25 ST/ 04 $Q_v p_v / Q_2$
 26 STO 07 Q_2
 27 ST/ 05 Δ_2 / Q_2
 28 *WA =?*" Δ_2 / Q_2
 29 PROMPT
 30 ST/ 07 Q_2 / W_2
 31 *M =?*" Q_2 / W_2
 32 PROMPT
 33 ST* 03 $Q_v p_v m / Q_2$
 34 *dL =?*" $Q_v p_v m / Q_2$
 35 PROMPT
 36 ST/ 03 $Q_v p_v m / Q_2 p_2$
 37 ST/ 04 $Q_v p_v / Q_2 p_2$
 38 15.217575
 39 /
 40 ST/ 05 $0.95(16.0185) A_2 Q_2 p_2$
 41 *PML =?*" $0.95(16.0185) A_2 Q_2 p_2$

42 PROMPT
43 ST# 03 ----- $\rho_{p,m} H_0 / \rho_p$
44 *PMV =?
45 PROMPT
46 ST# 03 ----- λ
47 *FW =?
48 PROMPT
49 ST# 03 ----- h_w
50 -1.890014
51 *
52 .04064
53 +
54 RCL 01
55 XT2
56 .061262
57 *
58 -
59 ST# 09 ----- -0.0254 h_p
60 RCL 07
61 6038.69
62 *
63 RCL 01
64 40.5
65 *
66 -
67 RCL 08
68 464.57
69 *
70 +
71 103.
72 +
73 ST# 05 ----- θ_a
74 *DL =?
75 PROMPT
76 SORT
77 28275.59069
78 *
79 RCL 05
80 *
81 RCL 01
82 .26

83 *
 84 .15
 85 +
 86 *
 87 STO 10 $\underline{\hspace{2cm}} N_2$
 88 -.29
 89 ST* 01 $\underline{\hspace{2cm}} -0.29 V_a$
 90 "LG =?"
 91 PROMPT
 92 7.874
 93 *
 94 RCL 07
 95 104.84
 96 *
 97 +
 98 RCL 08
 99 4.57
 100 *
 101 +
 102 .776
 103 +
 104 ST+ 01 $\underline{\hspace{2cm}} 0.776 + 4.57 W_a - 0.29 V_a + 104.84 Q_1 + 7.874 A$
 105 "DV =?"
 106 PROMPT
 107 ST* 06 $\underline{\hspace{2cm}} P_v D_v$
 108 "WV =?"
 109 PROMPT
 110 ST/ 06 $\underline{\hspace{2cm}} P_v D_v / W_v$
 111 RCL 06
 112 SORT
 113 ST* 01 $\underline{\hspace{2cm}} N_2$
 114 1
 115 -.434
 116 RCL 10
 117 RCL 01
 118 *
 119 *
 120 RCL 01
 121 RCL 03
 122 *
 123 RCL 10

124 +
125 /
126 1012
127 -

128 STO 06
129 RCL 03
130 RCL 01
131 100

FOG

132 *
133 *
134 RCL 10
135 RCL 03
136 RCL 01
137 *

138 +
139 /

140 STO 01
141 *DC =?
142 PROMPT
143 .0254

%Ra

144 /
145 3
146 -
147 .044

148 *
149 1
150 +
151 X↑2
152 RCL 07
153 12.078
154 *

155 RCL 02
156 .056
157 *

158 +
159 RCL 08
160 .591
161 *
162 +
163 .0124
164 +

165 X12
166 *
167 RCL 05
168 *
169 1/X
170 STO 10 ————— 1/D₀₂
171 *ZL =?
172 PROMPT
173 .0929
174 /
175 X12
176 ST* 10 ————— P₂
177 RCL 03
178 RCL 06
179 *
180 STO 11 ————— 2 Eon
181 1 —————
182 STO 15
183 RCL 10
184 XYY?
185 GTO 10
186 XEQ 01
187 STO 12
188 XEQ 02
189 STO 13
190 .5
191 STO 14
192 GTO 09
193 *LEL 10
194 2
195 STO 15
196 RCL 10
197 XYY?
198 GTO 11
199 XEQ 02
200 STO 12
201 XEQ 03
202 STO 13
203 1
204 STO 14
205 GTO 09

↓
Cálculo de la Figura 3

206•LBL 11
207 3
208 STO 15
209 RCL 10
210 X>Y?
211 GTO 12
212 XEQ 03
213 STO 12
214 XEQ 04
215 STO 13
216 2
217 STO 14
218 GTO 09
219•LBL 12
220 5
221 STO 15
222 RCL 10
223 X>Y?
224 GTO 13
225 XEQ 04
226 STO 12
227 XEQ 05
228 STO 13
229 3
230 STO 14
231 GTO 09
232•LBL 13
233 10
234 STO 15
235 RCL 10
236 X>Y?
237 GTO 14
238 XEQ 05
239 STO 12
240 XEQ 06
241 STO 13
242 5
243 STO 14
244 GTO 09
245•LBL 14
246 30

247 STO 15
248 RCL 10
249 X>Y?
250 GTO 15
251 XEQ 06
252 STO 12
253 XEQ 07
254 STO 13
255 10
256 STO 14
257 GTO 09
258*LBL 15
259 .6985
260 .7785
261 RCL 11
262 *
263 E1X
264 *
265 GTO 08
266*LBL 01
267 1.0473
268 .0047
269 RCL 11
270 *
271 +
272 RTN
273*LBL 02
274 1.0101
275 .2039
276 RCL 11
277 *
278 +
279 RTN
280*LBL 03
281 1.1016
282 .1746
283 RCL 11
284 *
285 E1X
286 *
287 RTN

288•LBL 04
289 1.1621
296 .2217
291 RCL 11
292 •
293 E1X
294 •
295 RTN
296•LBL 05
297 1.1117
298 .3
299 RCL 11
300 •
301 E1X
302 •
303 RTN
304•LBL 06
305 1.1278
306 .3993
307 RCL 11
308 •
309 E1X
310 •
311 RTN
312•LBL 07
313 .9235
314 .5794
315 RCL 11
316 •
317 E1X
318 •
319 RTN
320•LBL 09
321 RCL 13
322 RCL 12
323 -
324 RCL 15
325 RCL 14
326 -
327 /
328 RCL 10

329 RCL 14
330 -
331 *
332 RCL 12
333 +
334 *LBL 08
335 ST* 06
336 *S =? *
337 PROMPT
338 ST+ 09
339 RCL 02
340 RCL 09
341 /
342 12
343 *
344 STO 11
345 .1786
346 RCL 11
347 X<=Y?
348 GTO 16
349 .6
350 RCL 11
351 X<=Y?
352 GTO 17
353 -1.6361
354 16.6411
355 RCL 11
356 *
357 +
358 GTO 18
359 *LBL 16
360 398.4481
361 RCL 11
362 3.5999
363 Y↑X
364 *
365 GTO 18
366 *LBL 17
367 -2.5139
368 18.4512
369 RCL 11

Fin del cálculo de la Figura 3.

Emv

S'

120 Uv/s

Cálculo de la Figura 4

370 *
 371 +
 372 * LBL 18 ————— ↑ Fin del cálculo de la Figura 4
 373 1.5714735 E-5
 374 *
 375 ST 04 ————— [$Q_p = 0.454 (444) / Q_e p_s (3,600)^2] 2wT$
 376 * TS = ?
 377 PFOFPT
 378 ST 04 ————— T_e
 379 RCL 06
 380 1
 381 RCL 04
 382 RCL 06
 383 *
 384 +
 385 /
 386 RCL 03
 387 1
 388 -
 389 *
 390 1
 391 +
 392 LOG
 393 RCL 03
 394 LOG
 395 /
 396 100
 397 *
 398 STO 02 ————— H_0
 399 * FL *
 400 ARCL 01
 401 * % *
 402 RYIEW
 403 PSE
 404 PSE
 405 PSE
 406 PSE
 407 PSE
 408 PSE
 409 * E = *
 410 ARCL 02

411 "1 2"
412 REVIEW
413 END

Inicognits

Nomenclatura en la tesis

| | |
|-----|------|
| GV | Gv |
| Aa | Aa |
| dV | Pv |
| QL | Ql |
| WA | Wa |
| M | m |
| dL | pl |
| FML | Hl |
| PMV | Nv |
| HW | hw |
| DL | Dl |
| LG | △ |
| DV | Dv |
| MV | mv |
| DC | dc |
| ZL | Zl |
| S | S |
| TS | σ |
| RL | % Rl |

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Incógnita

Nomenclatura en la tesis

E

Eo

EXPLICACION DEL PROGRAMA

El programa preguntará el valor para cada variable en las unidades correspondientes, se teleará y se presionará la tecla " R/S " para que corra el programa.

Como resultados nos dara el porciento de resistencia en la fase líquida como " RL= % " y la eficiencia general como " E= % ".

EJEMPLO

A continuación se darán los siguientes datos para que sean introducidos a la calculador para que esto sirva como ejercicio y para un fin comparativo:

Carga del vapor = 0.9978 m³ / s

Area activa = 0.3001 m²

Densidad del vapor = 0.716 Kg / m³

Carga de líquido = 0.006406 m³ / s
Espesor promedio de flujo = 0.5307 m
Pendiente de la curva de equilibrio = 0.85
Densidad del líquido = 996 Kg / m³
Peso molecular del líquido = 18.0226 Kg / Kgmol
Peso molecular del vapor = 8.78 Kg / Kgmol
Altura del vertedero = 0.06 m
Difusividad en la fase líquida = 2.421 x 10⁻⁵ m² / s
Gradiente de líquido = 0.04 m
Difusividad en la fase vapor = 2.296 x 10⁻⁵ m² / s
Viscosidad del vapor = 1.122 x 10⁻⁴ Kg / (m s)
Diámetro de la cachuca = 0.0762 m
Distancia entre vertederos = 0.5307 m
Espacio entre platos = 0.5 m
Tensión superficial = 68 x 10⁻³ Kg / s²

Estos son todos los datos necesarios para que corra el programa y como resultado nos dará que la eficiencia es igual a 77.2241 %.

NOMENCLATURA

A = área seccional de la columna, metros cuadrados.

Aa = área activa, metros cuadrados = A - 2 Ad.

Ad = área de la bajante, metros cuadrados.

Dt = diámetro de la torre, metros.

De = coeficiente de difusión turbulenta, pies
cuadrados / segundo.

DI = coeficiente de difusión volumétrico en la fase
líquida, metros cuadrados / segundo.

Dv = coeficiente de difusión volumétrico en la fase
vapor, metros cuadrados / segundo.

Dik = coeficiente de difusión molecular del clave
ligero, metros cuadrados / segundo.

dc = diámetro de la cachucha, metros.

Emv = eficiencia de Murphree con base en la fase
vapor.

EcG = eficiencia general con base en la fase vapor.

Eo = eficiencia general.

Ew = eficiencia corregida por el arrastre.

ew = relación de arrastre, kilogramos de líquido /

kilogramos de vapor.

FA = área fraccional libre.

Fva = factor " F " basado en el área activa.

G = masa velocidad del vapor, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

Gm = moles velocidad del vapor, moles / (segundo, metro cuadrado).

hc = altura clara del líquido, pulgadas.

hf = altura de la espuma, pulgadas.

hw = altura del vertedero, metros.

lm = longitud del vertedero, metros.

L = flujo del líquido, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

Lm = velocidad molar del líquido, moles / (segundo, metro cuadrado).

M = peso molecular.

m = pendiente de la curva de equilibrio, y / x.

Ng = unidades de transferencia de la fase gaseosa.

Nl = unidades de transferencia de la fase líquida.

Ql = flujo del líquido, metros cúbicos / segundo.

Qv = carga de vapor, metros cúbicos / segundo.

r_e = fracción neta de líquido arrastrado.

S = espacio entre platos, metros.

S' = espacio entre platos corregido, metros = $S -$

0.0254 hf.

U_{vs} = velocidad del vapor basado en el área superficial, metros / segundo.

U_{va} = velocidad del vapor basado en el área activa, metros / segundo.

V = flujo de vapor, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

$W_a = (D_t + l_w) / 2$, anchura promedio de la trayectoria del flujo líquido en el plato, metros.

Z_l = distancia entre vertederos, longitud del desplazamiento del líquido, metros.

SUBFIJOS

l = líquido.

lk = líquido clave ligero.

v = vapor.

w = agua.

LETRAS GRIEGAS

Δ = gradiente del líquido, metros.

λ = factor de absorción, m Gm / Lm.

μ_v = viscosidad del vapor, kilogramos / (metro, segundo).

μ_l = viscosidad del líquido, kilogramos / (metro, segundo).

ρ_l = densidad del líquido, kilogramos / metro cúbico.

ρ_v = densidad del vapor, kilogramos / metro cúbico.

σ = tensión superficial, kilogramos / segundo cuadrado.

θ_l = tiempo de residencia del líquido, segundos.

CAPITULO 3: COLUMNAS EMPACADAS

COLUMNAS EMPACADAS

Las columnas empacadas se están utilizando ampliamente para relaciones grandes de flujos gas-líquido, como en las operaciones de destilación, absorción y en agotadores. Las columnas empacadas ofrecen la ventaja de que tienen un costo bajo y tiran poca presión.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

El siguiente procedimiento se usa para estimar la HETP (altura de empaque equivalente a un plato teórico) en operaciones de destilación.

1 -- Consulte la tabla 2 para obtener la HTU y la HETP para el sistema deseado o en su defecto para un sistema similar.

2 -- Si no se encuentran los datos en la tabla 2, usando el método de Bolles y Fair calcúlese la HETP. Este método ha sido verificado experimentalmente y es digno de confianza en la mayoría de los casos.

3 -- Comparese los valores calculados contra los valores recomendados en la industria (los cuales son obtenidos por la experiencia).

4 -- Seleccíonese el valor mas conservador.

T A B L A 2

| Sistema | Diam., m. | Empaque, tipo | tamaño, m. | Altura de la cama, m. | HETP, m. | HTU m. |
|----------------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| ----- | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| Hidrocarburos | | | | | | |
| Absorbedor | 0.91 | anillos Pall | 0.05 | 7 | 0.85 | |
| Olefinas ligeras | 0.91 | anillos Pall | 0.05 | 5.2 | 0.76 | |
| Olefinas pesadas | 1.22 | anillos Pall | 0.05 | 5.2 | 0.85 | |
| Destaniza- dor domos | 0.46 | anillos Pall | 0.038 | 6.1 | 0.88 | |
| Destaniza- dor fondos | 0.76 | anillos Pall | 0.05 | 5.5 | 1.01 | |
| Depropani- zador domos | 0.59 | anillos Pall | 0.038 | 4.88 | 0.98 | |
| Depropani- zador fondos | 0.59 | anillos Pall | 0.038 | 7.32 | 0.73 | |
| Debutani- zador domos | 0.5 | anillos Pall | 0.038 | 3.66 | 0.73 | |
| Debutani- zador fondos | 0.5 | anillos Pall | 0.038 | 5.49 | 0.61 | |
| Pentano / Isopentano | 0.46 | anillos Pall | 0.025 | 2.74 | 0.46 | |

| Sistema | Diam., m. | Empaque, tipo | tamaño, m. | Altura de la cama, m. | HETP, m. | HTU m. |
|---|--------------|--------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| Nafta | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 3.05 | 0.62 | .54 |
| | 0.38 | Intalox | 0.025 | 3.05 | 0.76 | .61 |
| | 0.38 | anillos Raschig | 0.025 | 3.05 | 0.71 | .52 |
| Isooctano / Tolueno | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 3.05 | 0.43 | .45 |
| | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 3.05 | 0.53 | .51 |
| Absorbedor- res de plantas de gas | 1.22 | anillos Pall | 0.025 | 7 | 0.88 | |
| 2,2,4-tri- metil pentano / metilciclo-hexano | 0.91 | Stedman | | 7.6 | 0.88 | |
| | 3.35 | Stedman | | 2.1 | 0.13 | |

=====
 Hidrocarburos / Agua

| | | | | | | |
|---------|------|-----------------|-------|------|------|-----|
| Acetona | 0.36 | Intalox | 0.025 | 3.96 | 0.46 | |
| | 0.46 | anillos Pall | 0.025 | 8.38 | 0.37 | |
| Metanol | 0.61 | Intalox | 0.038 | 4.27 | | .76 |
| | 0.41 | anillos Pall | 0.025 | 4.27 | | .52 |

| Sistema | Diam., m. | Empaque, tipo | tamaño, m. | Altura de la cama, m. | HETP, m. | HTU m. |
|---|--------------|-------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| | 0.3 | Intalox | 0.025 | 8.23 | 0.46 | |
| Isopropanos | 0.53 | Pall plasticos | 0.038 | 4.88 | | .84 |
| | 0.33 | Intalox | 0.025 | 6.4 | | .76 |
| | 0.46 | Intalox | 0.025 | 3.35 | 0.48 | |
| Etilen glicol | 1.07 | anillos Pall | 0.038 | 4.88 | 0.91 | |
| Propilen glicol | 0.25 | Intalox | 0.013 | 1.83 | | .86 |
| Furfural | 0.51 | Intalox | 0.038 | 5.49 | 0.61 | |
| Acido Formico | 0.91 | anillos Pall | 0.05 | 10.67 | 0.76 | |
| Acetona | 0.61 | Intalox | 0.038 | 5.49 | | .46 |
| Cloruro de benzol/ Benceno / Vapor de agua | 0.61 | anillos Pall | 0.025 | 5.18 | | 1 |
| Aceite de pino / vapor de agua | 3.66 | Intalox | 0.05 | 10.46 | 0.76 | |
| Metiliso- butilcetona / vapor de agua | 1.07 | Intalox | 0.038 | 8.53 | 1.22 | |
| Acetona | 0.38 | Intalox | 0.05 | 2.9 | 0.53 | .47 |

| Sistema | Diam., m. | Empaque, tipo | tamaño, m. | Altura de la cama, m. | HETP, m. | HTU m. |
|---------|--------------|---------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| | 0.38 | anillos Pall | 0.038 | 2.9 | 0.46 | .55 |
| | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 2.9 | 0.44 | .34 |
| | 0.38 | Intalox | 0.025 | 2.9 | 0.52 | .32 |
| | 0.38 | Berl | 0.025 | 2.9 | 0.52 | .34 |
| | 0.38 | Raschig cerámica | 0.025 | 2.9 | 1.05 | .36 |
| | 0.38 | anillos Raschig | 0.025 | 2.9 | 0.52 | .36 |
| | 0.38 | anillos Pall | 0.016 | 2.9 | 0.4 | .32 |
| Metanol | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 2.9 | 0.66 | .67 |

=====
 Hidrocarburos polares

| | | | | | | |
|--|------|---------|-------|-------|------|--|
| Metil furan / Metil tetra-hidrofuran | 0.61 | Intalox | 0.038 | 14.63 | 0.53 | |
| Acido benzoico / Tolueno | 0.61 | Intalox | 0.038 | 6.4 | 0.46 | |

| Sistema | Diam. m. | Empaque, tipo | tamaño. m. | Altura de la cama. m. | HETP. m. | HTU m. |
|--|-------------|------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| 5,5 dimetil 1,3 ciclohexanodiona | 0.56 | anillos Pall | 0.038 | 9.75 | 0.49 | |
| Alquitran | 0.46 | anillos Pall | 0.038 | 9.14 | 0.49 | |
| Cresoles / Benceno / Monocloro benceno | 0.46 | anillos Pall | 0.038 | 9.14 | 0.85 | |
| | 0.38 | Intalox | 0.038 | 2.9 | 1.8 | .52 |
| | 0.38 | Intalox | 0.025 | 2.9 | 1.13 | .76 |
| Metiletilcetona / Tolueno | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 2.9 | 0.35 | .29 |
| | 0.38 | anillos Raschig | 0.025 | 2.9 | 0.3 | .31 |
| | 0.38 | Intalox | 0.025 | 2.9 | 0.23 | .27 |
| | 0.38 | Berl | 0.025 | 2.9 | 0.31 | .31 |
| | 0.38 | Raschig cerámica | 0.025 | 2.9 | 0.46 | .3 |
| | 0.38 | anillos Pall | 0.025 | 2.9 | 0.4 | .28 |
| | 0.38 | anillos Raschig | 0.025 | 2.9 | 0.35 | .3 |
| | 0.38 | Intalox | 0.025 | 2.9 | 0.29 | .26 |
| | 0.38 | Berl | 0.025 | 2.9 | 0.34 | .29 |

| Sistema | Diam., m. | Empaque, tipo | tamaño, m. | Altura de la cama, m. | HETP, m. | HTU m. |
|---|--------------|---------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| | 0.38 | Raschig ceramica | 0.025 | 2.9 | 0.31 | .27 |
| Fenol / Orto-cresol | 0.46 | anillos Pall | 0.038 | 9.14 | 0.49 | |
| Acidos grasos | 0.76 | anillos Pall | 0.038 | 12.19 | 0.85 | |
| Benceno / Mono cloro-benceno | 1.83 | Intalox | 0.038 | 9.75 | 1.07 | |
| CH ₂ Cl / CH ₂ Cl ₂ / CHCl ₃ / CCl ₄ | 0.48 | Intalox | 0.025 | 20.73 | 0.46 | |
| Metileno | 0.64 | Intalox | 0.038 | 13.72 | 0.46 | |
| Cloroformo | 0.56 | Intalox | 0.038 | 27043 | 0.46 | |

Para la absorción y para las columnas de secado de hidrocarburos (separación del agua de los hidrocarburos) los valores de la HETP pueden ser muy grandes. En estos casos, se debe de consultar el manual del tipo de empaque usado pues en estos casos no existe una correlación que sea adecuada y confiable para calcular la HETP para este tipo de columnas.

METODO DE BOLLES Y FAIR

El modelo original fue hecho para anillos Raschig de cerámica y para sillas Berl. Bolles y Fair hicieron ajustes al parámetro de empaque para poder extender el método para que pudiera ser utilizado con empaques de metal. El ajuste consistió en estudiar la relación entre dos factores que son: el área superficial específica ap del empaque seco y de la fracción de espacios vacíos de empaque. Esta relación se ha usado en modelos a velocidades de inundación para distinguir los efectos debidos a las dimensiones de los empaques.

Su modelo mejorado de transferencia de masa utiliza

las siguientes ecuaciones, con correlaciones de parámetros ajustados, para dar la altura de una unidad de transferencia para la fase líquida y para la fase gas.

La altura de una unidad de transferencia de masa para la fase gas esta dada por:

$$H_v = \left[\Psi \left(D_t / 0.3048 \right)^a \left(Z_p / 3.048 \right)^{1/3} \left(S_{cv} \right)^{0.5} \right] / \left[737.34 G_1 f_m f_p f_c \right]^b$$

donde:

Ψ = parámetro para un material dado de empaque;

véanse las figuras de la 5 a la 8.

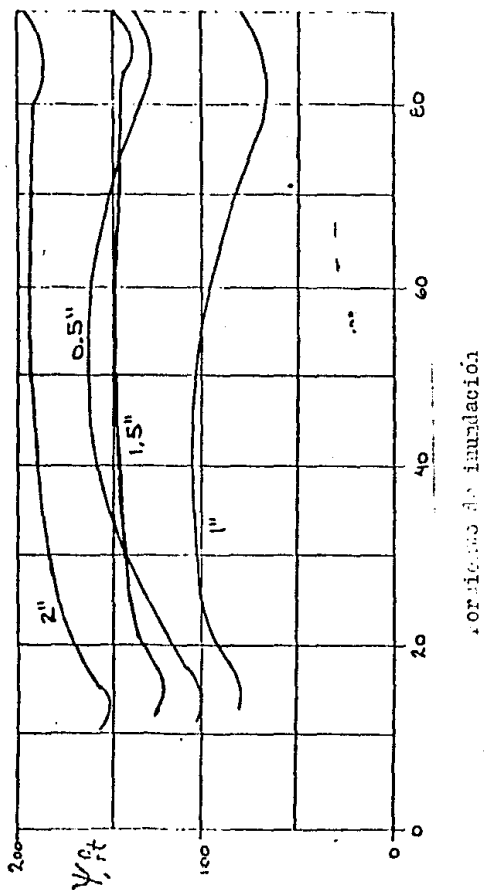


Fig. 5. Anillos Raschig de cerámica, usada para Calcular I.

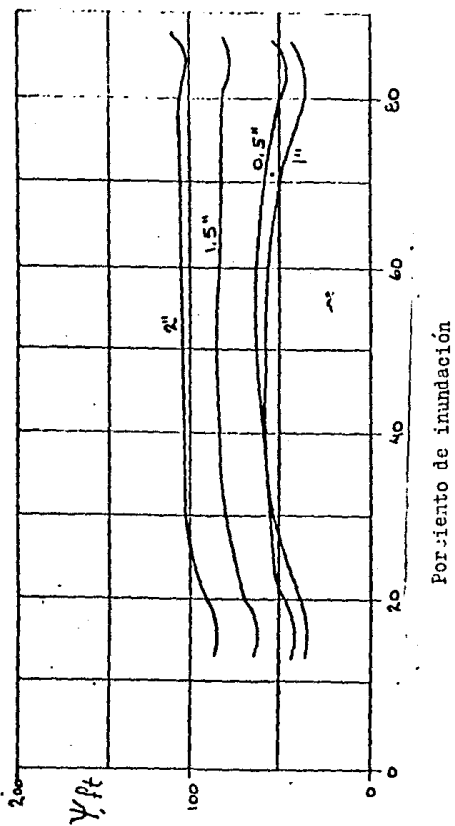


Fig. 6. Anillos Raschig de metal, usada para calcular I.

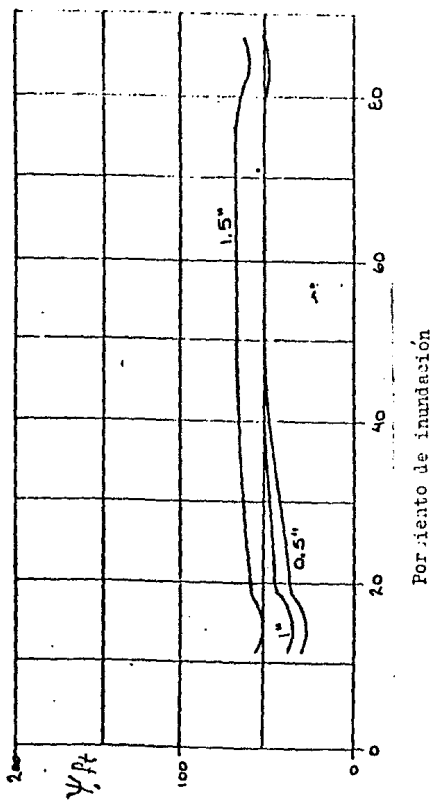


Fig. 7. Sillas Berl de cerámica, usada para calcular I.

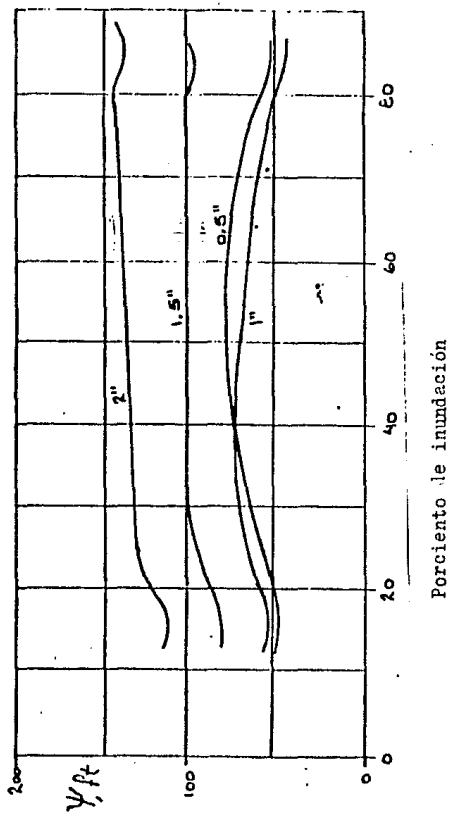


Fig. 8. Anillos Pall de metal, usada para calcular I.

D_t = diámetro de la torre, si es mayor a 0.6096 metros entonces D_t será igual a 0.6096 metros.

a = 1.24 para anillos y 1.11 para silla.

b = 0.6 para anillos y 0.5 para sillas.

f_m = (m_l / m_w)

f_p = (p_l / p_w)

f_{σ} = (σ_l / σ_w)

G_l = masa velocidad del líquido basada en el área seccional de la columna, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

Sc_v = m_v / ($p_v D_v$)

Z_p = altura de la cama empacada, metros.

La altura de una unidad de transferencia de masa para la fase líquida esta dada por:

$$H_l = \phi C_{f1} (Z_p / 3.048)^{0.16} (Sc_l)^{0.6}$$

donde:

ϕ = parámetro para un material dado de empaque, véanse las figuras de la 9 a la 12.

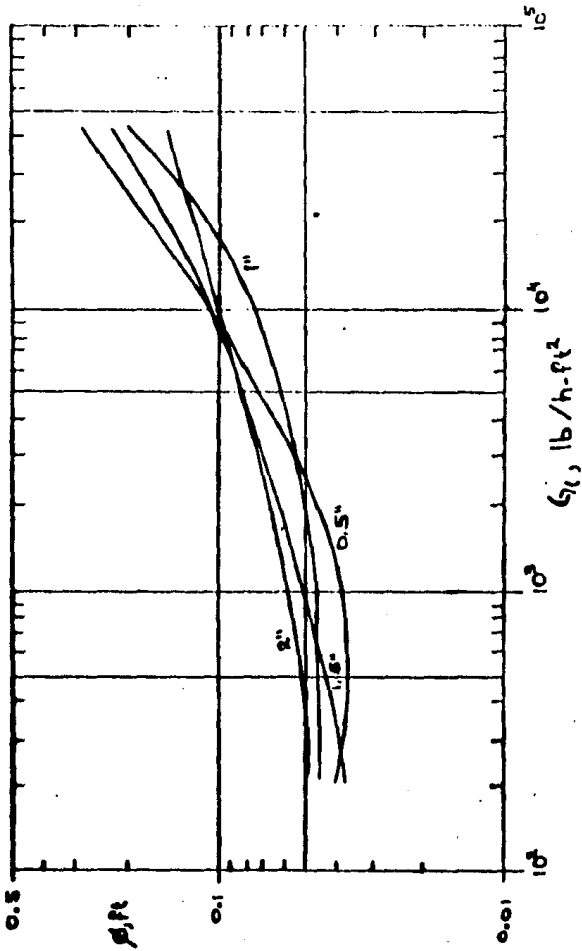


Fig. 9. Anillos Raschig de cerámica, usada para calcular I.

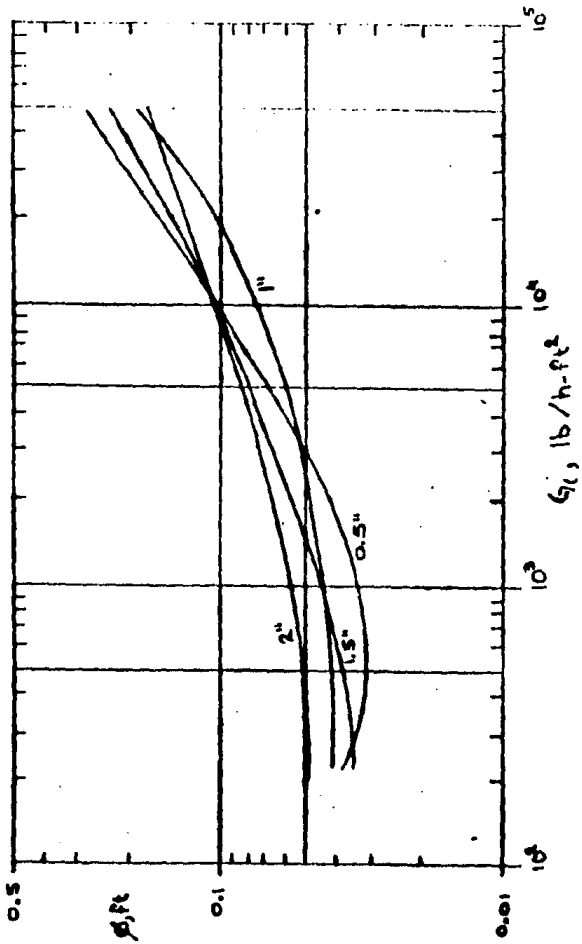


Fig. 16. Anillos Raschig de metal, usada para calcular I.

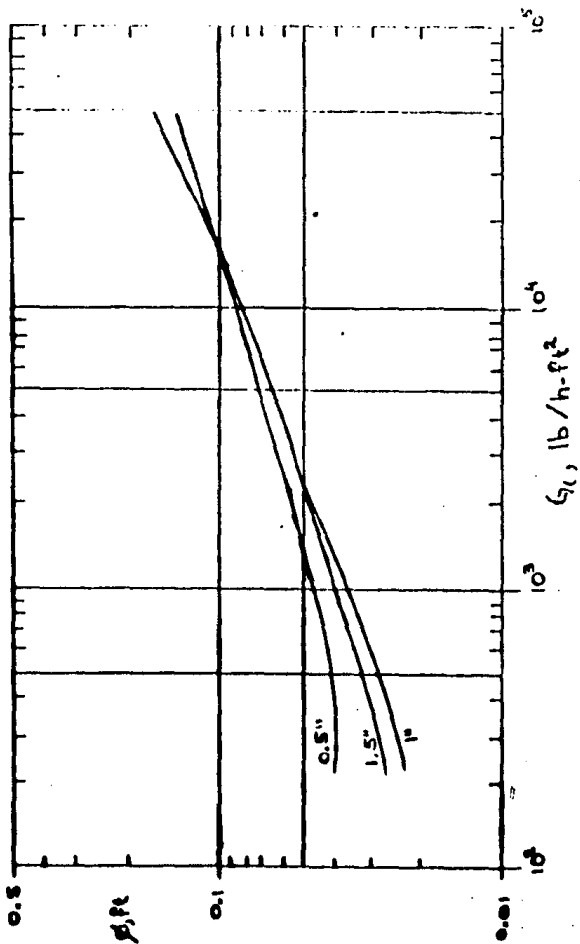


Fig. 11. Sillas Berl de cerámica, usada para calcular I.

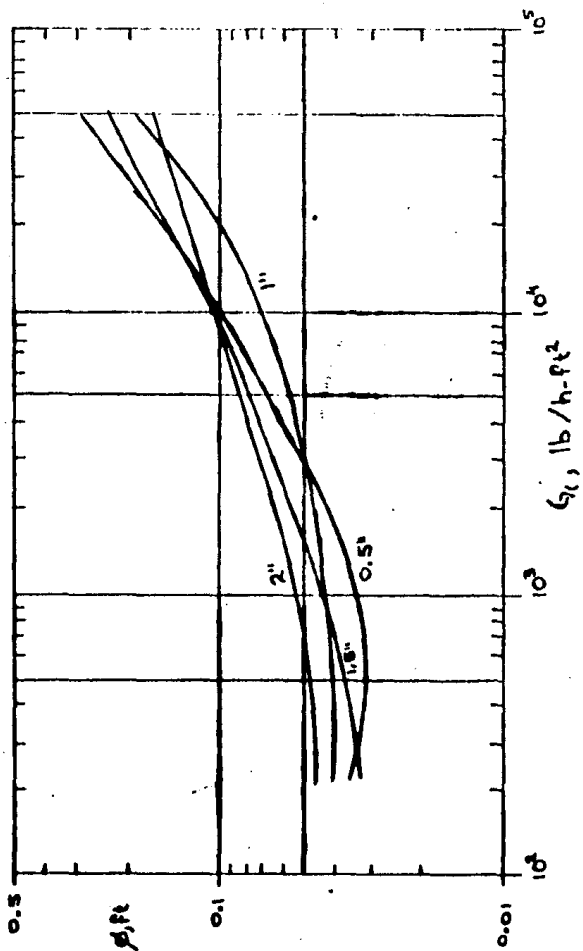


Fig. 12. Anillos Pall de metal, usada para calcular I.

Cf1 = función de Fr, vease la figura 13.

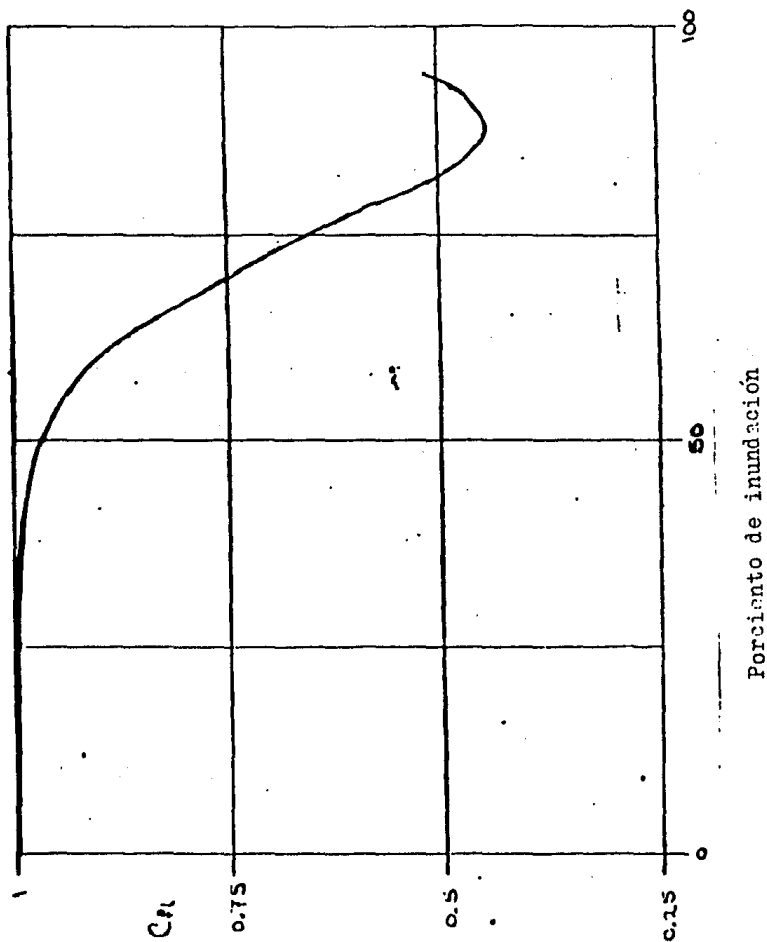


Fig. 13. Coeficiente para la transferencia de masa en la fase líquida, usado para calcular C_{fl} .

$Fr = U_{vs} / U_{vsf}$ a valor constante de L / V .

U_{vs} = velocidad del vapor basada en el área superficial, metros / segundo.

$U_{vsf} = G_{vsf} / p_v$.

$Sc_l = \mu_l / (\rho_l D_l)$

G_{vsf} = véase la figura 14.

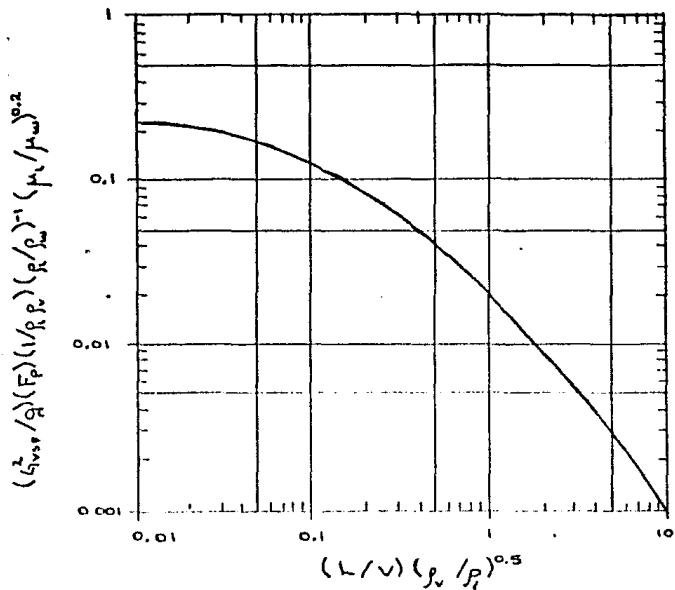


Fig. 14. Correlación de Eckert para la inundación,
usada para calcular G_{vsf} .

T A B L A 3

Valores para factores de empaque (Fp).

| Tipo de empaque | Material | Diámetro exterior o tamaño nominal, pulgadas | Longitud, pulgadas | Espesor de pared, pulgadas | Fp, 1 / m |
|-----------------|----------|--|--------------------|----------------------------|-----------|
| Anillos Raschig | cerámica | 0.5 | 0.5 | 3 / 32 | 1,903 |
| | | 1 | 1 | 1 / 8 | 509 |
| | | 1.5 | 1.5 | 3 / 16 | 312 |
| | | 2 | 2 | 1 / 4 | 213 |
| | metal | 0.5 | 0.5 | 1 / 32 | 984 |
| | | 1 | 1 | 1 / 32 | 377 |
| | | 0.5 | 0.5 | 1 / 16 | 1,345 |
| | | 1 | 1 | 1 / 16 | 449 |
| | | 1.5 | 1.5 | 1 / 16 | 272 |
| | | 2 | 2 | 1 / 16 | 187 |

| Tipo de empaque | Material | Diámetro exterior o tamaño nominal, pulgadas | Longitud, pulgadas | Espesor de pared, pulgadas | Fp, 1 / m |
|-----------------|----------|--|--------------------|----------------------------|-----------|
|-----------------|----------|--|--------------------|----------------------------|-----------|

=====

| | | | | | |
|--------------|----------|-----|-----|--|-----|
| Sillas Berl | cerámica | 0.5 | | | 787 |
| | | 1 | | | 361 |
| | | 1.5 | | | 213 |
| Anillos Pall | metal | 1 | 1 | | 157 |
| | | 1.5 | 1.5 | | 92 |
| | | 2 | 2 | | 66 |

Se debe hacer notar que las expresiones para calcular la H_v y la H_l incluyen contribuciones debidas a la distribución del líquido, empaque, humedecimiento y propiedades del sistema así como de la forma y tamaño del empaque utilizado.

De acuerdo con Ludwig, Silvey y Keller, y Billet, la correlación de altura de empaque ($Z_p / 3.048$), puede ser ignorada si la columna tiene una buena distribución de líquido. Más aun, se recomienda que para alturas de camas empacadas que se encuentren entre 3.048 metros y 7.62 metros, $Z_p / 3.048$ sea igual a uno, donde se utilizan distribuidores de líquido y el diámetro de la columna es igual o mayor a 0.61 metros.

Para obtener la altura equivalente a un plato teórico utilizando la H_l y la H_v se resuelven las siguientes ecuaciones:

$$H_{ov} = H_v + \lambda H_l$$

$$H_{tp} = H_{ov} \ln \lambda / (\lambda - 1)$$

donde:

λ = relación de las pendientes de la curva de equilibrio a las curvas de operación (factor de absorción), $m V / L$.

Bolles y Fair recomiendan que el valor obtenido de Htp se multiplique por un factor de seguridad (Fs) que sea igual a 1.7 (basado en un 95 % de seguridad en la confiabilidad de los datos correlacionados).

Sin embargo, Porter y Jenkins revisaron la información usada por Bolles y Fair y eliminaron corridas a valores máximos y mínimos de velocidades de borboteo o burbujeo. Estos solo usaron valores de destilación y omitieron los valores del sistema aire-agua. Basados en estos datos, encontraron que el factor de seguridad (Fs) es igual a 1.19 . Para nuestros diseños se recomienda que se utilice un factor de seguridad (Fs) igual a 1.25 .

REGLAS DE LA EXPERIENCIA

Se establece que los valores de la HETP son notablemente constantes para sistemas orgánicos e

inorgánicos. Hasta con valores altos de tensión superficial del líquido, se consigue un buen cumplimiento si el empaque se humedece apropiadamente por ejemplo, si el flujo del líquido se mantiene superior a 1.356 kg / (s m) y la dificultad de humedecer plásticos como los fluorocarbonos es prevenida.

En columnas comerciales, los valores de la HETP para eficiencias altas en el empaque están alrededor de los 0.457 metros para un empaque de tamaño nominal igual a 0.0254 metros; 0.66 metros para un tamaño nominal igual a 0.0381 metros, y 0.889 metros para un tamaño nominal de 0.0508 metros. Estos valores están de un 0.15 a un 0.205 metros mayores que los valores publicados obtenidos en la operación muy controlada de columnas en plantas piloto.

Debido a la poca irrigación la eficiencia en las columnas que trabajan a vacío, se recomienda que se sume un valor extra de 0.15 metros a los valores listados anteriormente para la HETP. En sistemas de absorción generalmente los valores para la HETP van de 1.52 hasta 1.83 metros. Para columnas pequeñas (diámetros menores a 0.61 metros), una antigua regla dada por la experiencia

prueba una exactitud sorprendente si se usa el tamaño de empaque correcto y si se carga la columna con el empaque apropiadamente. Esta regla establece que los valores para la HETP es igual al diámetro de la columna.

A continuación se da el programa para calcular la eficiencia por el método propuesto por Bolles y Fair para una calculadora Hp-41.

PROGRAMA POR EL METODO DE BOLLES Y FAIR

PRIMERA PARTE

01•LBL "BF1"
02 1.24
03 STO 01 ————— Constante "a" para anillos
04 .6
05 STO 02 ————— Constante "b" para anillos.
06 TONE 1
07 "TIPO EMPAQUE"
08 AVIEW
09 PSE
10 "RC, RM, BC, FM"
11 ROM
12 PROMPT
13 ROFF
14 ASTO 03 ————— Tipo de empaque
15 TONE 1
16 "TAMANO =?"
17 AVIEW
18 PSE
19 ".5, 1, 1.5, 2 ="
20 "I?"
21 PROMPT
22 STO 09 ————— Tamaño de empaque
23 1
24 RCL 09
25 X=Y?
26 SF 01
27 1.5
28 X=Y?
29 SF 02
30 2
31 RCL 09
32 X=Y?
33 SF 03
34 "BC"
35 ASTO X ————— Meter "BC" en la memoria X
36 RCL 08
37 X*Y?
38 GTO 01
39 1.11
40 STO 01 ————— Constante "a" para anillos.
41 .5

42 STO 02 ————— Constante "b" para cillas.
 43 LBL 01
 44 "dL =?"
 45 PROMPT
 46 STO 03 ————— ρ_a
 47 X↑2
 48 9.807
 49 *
 50 STO 04 ————— $\rho_a^2 a$
 51 "dV =?"
 52 PROMPT
 53 ST+ 04 ————— $\rho_a^2 a V$
 54 STO 05 ————— ρ_v
 55 "FP =?"
 56 PROMPT
 57 1000
 58 *
 59 ST/ 04 ————— $\rho_a^2 a \rho_v / F_p$
 60 "ML =?"
 61 PROMPT
 62 STO 06 ————— μ_a
 63 .001
 64 /
 65 -.2
 66 Y↑X
 67 ST+ 04 ————— $\rho_a^2 a \rho_v (\mu_a / \rho_a)^{-0.2} / F_p$
 68 "L =?"
 69 PROMPT
 70 STO 07 ————— L
 71 "V =?"
 72 PROMPT
 73 ST/ 07 ————— L/V
 74 RCL 05
 75 RCL 03
 76 /
 77 SORT
 78 ST+ 07 ————— $(\rho_v / \rho_a)^{0.5} (L/V)$
 79 .07
 80 RCL 07
 81 X(=Y?
 82 GTO 02

↓
 Cálculo de la Figura 14

83 .1
84 RCL 07
85 X<=Y?
86 GTO 03
87 .3
88 RCL 07
89 X<=Y?
90 GTO 04
91 .7
92 RCL 07
93 X<=Y?
94 GTO 05
95 1
96 RCL 07
97 X<=Y?
98 GTO 06
99 5
100 RCL 07
101 X<=Y?
102 GTO 07
103 .0332
104 RCL 07
105 -1.5188
106 Y↑X
107 *
108 GTO 08
109•LBL 02
110 .2459
111 -6.9403
112 RCL 07
113 *
114 E↑X
115 *
116 GTO 08
117•LBL 03
118 .2879
119 -.0029
120 RCL 07
121 *
122 +
123 GTO 08

124*LBL 04
125 .029
126 RCL 07
127 -.6458
128 Y↑X
129 *
130 GTO 08
131*LBL 05
132 .023
133 RCL 07
134 -.8376
135 Y↑X
136 *
137 GTO 08
138*LBL 06
139 .0199
140 -.0302
141 RCL 07
142 LN
143 *
144 +
145 GTO 08
146*LBL 07
147 .0199
148 RCL 07
149 -1.1938
150 Y↑X
151 *
152*LBL 08
153 RCL 04
154 *
155 SQRT
156 RCL 05
157 /
158 1/X
159 STO 04
160 "UVS =?"
161 PROMPT
162 100
163 *
164 ST* 04

Fin del cálculo de la Figura 14

1/UVS

UVS/UVS

165 "GL =?"

166 PROMPT

167 737.34

168 *

169 STO 09

170 MRC

61 (737.34)

CALCULA DE LAS FIGURAS 5 Y 9

RASCHIG DE CERAMICA

01•LBL "RC"
02 FS?C 01
03 GTO 09
04 FS?C 02
05 GTO 10
06 FS?C 03
07 GTO 11
08 500
09 RCL 09
10 X<=Y?
11 GTO 13
12 5000
13 RCL 09
14 X<=Y?
15 GTO 14
16 8900
17 RCL 09
18 X<=Y?
19 GTO 15
20 28000
21 RCL 09
22 X<=Y?
23 GTO 16
24 .0002
25 RCL 09
26 .6962
27 Y↑X
28 •
29 GTO 17
30•LBL 13
31 .0009
32 RCL 09
33 -.1336
34 Y↑X
35 •
36 GTO 17
37•LBL 14
38 .0322
39 RCL 09
40 .0002
41 •

→
Cálculo de la Figura 9 para 0.5"

42 E+X
43 *
44 GTO 17
45•LBL 15
46 .001
47 RCL 09
48 .582
49 Y+X
50 *
51 GTO 17
52•LBL 16
53 .0393
54 RCL 09
55 6.7556 E-6
56 *
57 +
58•LBL 17
59 STO 08
60 45
61 RCL 04
62 X<=Y?
63 GTO 18
64 55
65 RCL 04
66 X<=Y?
67 GTO 19
68 65
69 RCL 04
70 X<=Y?
71 GTO 20
72 85
73 RCL 04
74 X<=Y?
75 GTO 21
76 -14.3
77 RCL 04
78 1.68
79 *
80 +
81 GTO 12
82•LBL 18

fin del cálculo de la Figura 9 para 0.5"

Cálculo de la Figura 5 para 0.5"

83 81.1167
84 RCL 04
85 1.8567
86 *
87 +
88 GTO 12
89•LBL 19
90 133.9321
91 7.8971
92 RCL 04
93 LN
94 *
95 +
96 GTO 12
97•LBL 20
98 196.6984
99 RCL 04
100 -.0035
101 *
102 ETX
103 *
104 GTO 12
105•LBL 21
106 251.7
107 RCL 04
108 -1.456
109 *
110 +
111 GTO 12
112•LBL 09
113 6000
114 RCL 09
115 X=Y?
116 GTO 13
117 20000
118 RCL 09
119 X=Y?
120 GTO 14
121 .0206
122 RCL 09
123 4.3386 E-6

Fin del cálculo de la Figura 8 para 0.5"

Cálculo de la Figura 9 para 1"

124 *
125 +
126 GTO 15
127*LBL 13
128 .0433
129 RCL 09
130 3.5578 E-6
131 *
132 +
133 GTO 15
134*LBL 14
135 .0514
136 RCL 09
137 3.7361 E-5
138 *
139 ETX
140 *
141*LBL 15
142 STO 08
143 40
144 RCL 04
145 X<=Y?
146 GTO 16
147 85
148 RCL 04
149 X<=Y?
150 GTO 17
151 -120.8
152 RCL 04
153 2.24
154 *
155 +
156 GTO 12
157*LBL 16
158 74.4107
159 RCL 04
160 .8636
161 *
162 +
163 GTO 12
164*LBL 17

Fin del cálculo de la figura 9 para 1"

Cálculo de la figura 5 para 1"

165 151.1267
166 RCL 04
167 -.9787
168 *
169 +
170 GTO 12
171 *LBL 10
172 500
173 RCL 09
174 X<=Y?
175 GTO 13
176 000
177 RCL 09
178 X<=Y?
179 GTO 14
180 2000
181 RCL 09
182 X<=Y?
183 GTO 15
184 5000
185 RCL 09
186 X<=Y?
187 GTO 16
188 .068
189 RCL 09
190 3.8329 E-6
191 *
192 +
193 GTO 17
194 *LBL 13
195 -.0042
196 .0075
197 RCL 09
198 LN
199 *
200 +
201 GTO 17
202 *LBL 14
203 -.0271
204 .0112
205 RCL 09

Fin del cálculo de la figura 5 para 1"

Cálculo de la figura 9 para 1.5"

206 LN
207 *
208 +
209 GTO 17
210 *LBL 15
211 -.0511
212 .0148
213 RCL 09
214 LN
215 *
216 +
217 GTO 17
218 *LBL 16
219 .0441
220 RCL 09
221 8.7 E-6
222 *
223 +
224 *LBL 17
225 STO 08
226 50
227 RCL 04
228 X<Y?
229 GTO 18
230 00
231 RCL 04
232 X<Y?
233 GTO 19
234 05
235 RCL 04
236 X<Y?
237 GTO 20
238 -3.1
239 RCL 04
240 1.68
241 *
242 +
243 GTO 12
244 *LBL 18
245 120.0133
246 RCL 04

Fin del calculo de la figura 9 para 1.5"

Calculo de la figura 5 para 1.5"

247 .614
248 *
249 +
250 GTO 12
251 LBL 19
252 156.25
253 RCL 04
254 -.15
255 *
256 +
257 GTO 12
258 LBL 20
259 211.1
260 RCL 04
261 -.84
262 *
263 +
264 GTO 12
265 LBL 11
266 500
267 RCL 09
268 X<=Y?
269 GTO 13
270 2000
271 RCL 09
272 X<=Y?
273 GTO 14
274 5000
275 RCL 09
276 X<=Y?
277 GTO 15
278 .0092
279 RCL 09
280 .2611
281 Y↑X
282 *
283 GTO 16
284 LBL 13
285 .0475
286 RCL 09
287 .0001

Fin del cálculo de la figura 5 para 1.5"

Cálculo de la figura 9 para 2"

288 *
289 E1X
290 *
291 GTO 16
292*LBL 14
293 -.0135
294 .0105
295 RCL 09
296 LN
297 *
298 +
299 GTO 16
300*LBL 15
301 .0543
302 RCL 09
303 .0001
304 *
305 E1X
306 *
307*LBL 16
308 STO 03
309 40
310 RCL 04
311 X<=Y?
312 GTO 17
313 50
314 RCL 04
315 X<=Y?
316 GTO 18
317 85
318 RCL 04
319 X<=Y?
320 GTO 19
321 19.4
322 RCL 04
323 1.96
324 *
325 +
326 GTO 12
327*LBL 17
328 140.9321

Inicio del calculo de la Figura 9 para z"

Calculo de la Figura 5 para z"

329 RCL 04
330 1.2736
331 *
332 +
333 CTO 12
334+LBL 18
335 172.6862
336 RCL 04
337 .0022
338 *
339 E1X
340 *
341 CTO 12
342+LBL 19
343 200.95
344 RCL 04
345 -.1333
346 *
347 +
348+LBL 12
349 NRG

Fin del calculo de la figura 5 pags 2^a

CALCULO DE LAS FIGURAS 6 Y 10
ANILLOS RASCHIG DE METAL

01•LBL RM
02 FS?C 01
03 GTO 09
04 FS?C 02
05 GTO 10
06 FS?C 03
07 GTO 11
08 500
09 RCL 09
10 X<=Y?
11 GTO 13
12 6000
13 RCL 09
14 X<=Y?
15 GTO 14
16 10000
17 RCL 09
18 X<=Y?
19 GTO 15
20 .0003
21 RCL 09
22 .6425
23 Y↑X
24 •
25 GTO 16
26•LBL 13
27 .217
28 RCL 09
29 -.3164
30 Y↑X
31 •
32 GTO 16
33•LBL 14
34 .0258
35 RCL 09
36 0.1885 E-6
37 •
38 +
39 GTO 16
40•LBL 15
41 .0457

Calculo de la Figura 10 para 0.5"

42 RCL 09
43 .0001
44 *
45 EYX
46 *
47 LBL 16
48 STO 08
49 20
50 RCL 04
51 X<=Y?
52 GTO 17
53 30
54 RCL 04
55 X<=Y?
56 GTO 18
57 50
58 RCL 04
59 X<=Y?
60 GTO 19
61 85
62 RCL 04
63 X<=Y?
64 GTO 20
65 -116.3
66 RCL 04
67 1.94
68 *
69 +
70 GTO 12
71 LBL 17
72 51.3924
73 -4.6009
74 RCL 04
75 LN
76 *
77 +
78 GTO 12
79 LBL 18
80 -74.1183
81 37.7146
82 RCL 04

Fin del cálculo de la figura 10 para 0.5"

Cálculo de la figura 6 para 0.5"

83 LN
84 *
85 +
86 GTO 12
87•LBL 19
88 -8.7429
89 18.6484
90 RCL 84
91 LN
92 *
93 +
94 GTO 12
95•LBL 28
96 98.8687
97 RCL 84
98 -.4757
99 *
100 +
101 GTO 12
102•LBL 09
103 6000
104 RCL 09
105 X<=Y?
106 GTO 13
107 20000
108 RCL 09
109 X<=Y?
110 GTO 14
111 .0001
112 RCL 09
113 .6816
114 YX
115 *
116 GTO 15
117•LBL 13
118 .0398
119 RCL 09
120 3.7674 E-6
121 *
122 +
123 GTO 15

Fine del cálculo de la figura 6 por 0.5"

Cálculo de la figura 10 por 1"

124*LBL 14
125 .0437
126 RCL 09
127 2.9724 E-6
128 *
129 +
130*LBL 15
131 STO 08
132 45
133 RCL 04
134 X<=Y?
135 GTO 16
136 55
137 RCL 04
138 X<=Y?
139 GTO 17
140 70
141 RCL 04
142 X<=Y?
143 GTO 18
144 80
145 RCL 04
146 X<=Y?
147 GTO 19
148 .1293
149 RCL 04
150 .0693
151 *
152 E↑X
153 *
154 GTO 12
155*LBL 16
156 42.856
157 RCL 04
158 .4052
159 *
160 +
161 GTO 12
162*LBL 17
163 93.8242
164 RCL 04

Fin del cálculo de la figura 10 para 1"

Cálculo de la figura 6 para 1"

165 -.1193
166 YIX
167 *
168 GTO 12
169 *LBL 18
170 85.15
171 RCL 04
172 -.47
173 *
174 +
175 GTO 12
176 *LBL 19
177 158.7167
178 RCL 04
179 -1.53
180 *
181 +
182 GTO 12
183 *LBL 10
184 500
185 RCL 09
186 X=Y?
187 GTO 13
188 800
189 RCL 09
190 X=Y?
191 GTO 14
192 2000
193 RCL 09
194 X=Y?
195 GTO 15
196 6000
197 RCL 09
198 X=Y?
199 GTO 16
200 20000
201 RCL 09
202 X=Y?
203 GTO 17
204 .0086
205 RCL 09

Fin del cálculo de la figura 6 para 1"

Cálculo de la figura 10 para 1.5"

206 .5471
207 Y+X
208 *
209 GTO 18
210*LBL 13
211 .0321
212 RCL 09
213 .0003
214 *
215 E+X
216 *
217 GTO 18
218*LBL 14
219 .0285
220 RCL 09
221 1.7643 E-5
222 *
223 +
224 GTO 18
225*LBL 15
226 .0353
227 RCL 09
228 .0002
229 *
230 E+X
231 *
232 GTO 18
233*LBL 16
234 .0033
235 RCL 09
236 .372
237 Y+X
238 *
239 GTO 18
240*LBL 17
241 .0585
242 RCL 09
243 4.3655 E-6
244 *
245 +
246*LBL 18

Inicio del calculo de la figura 10 para 1.5"

Calculo de la figura 6 para 1.5"

247 STO 03
248 28
249 RCL 04
250 X(=Y?
251 GTO 19
252 35
253 RCL 04
254 X(=Y?
255 GTO 28
256 45
257 RCL 04
258 X(=Y?
259 GTO 21
260 55
261 RCL 04
262 X(=Y?
263 GTO 22
264 65
265 RCL 04
266 X(=Y?
267 GTO 23
268 75
269 RCL 04
270 X(=Y?
271 GTO 24
272 85
273 RCL 04
274 X(=Y?
275 GTO 25
276 -85.7
277 RCL 64
278 1.94
279 *
280 +
281 GTO 12
282 *LBL 19
283 83.6969
284 -5.3446
285 RCL 04
286 LN
287 *

288 +
289 GTO 12
290*LBL 20
291 -3.0277
292 24.6456
293 RCL 04
294 LN
295 *
296 +
297 GTO 12
298*LBL 21
299 64.7951
300 5.6298
301 RCL 04
302 LN
303 *
304 +
305 GTO 12
306*LBL 22
307 80.364
308 1.5187
309 RCL 04
310 LN
311 *
312 +
313 GTO 12
314*LBL 23
315 97.5333
316 RCL 04
317 -.2
318 *
319 +
320 GTO 12
321*LBL 24
322 91.6667
323 RCL 04
324 -.11
325 *
326 +
327 GTO 12
328*LBL 25

329 122.6593
330 RCL 04
331 -.005
332 *
333 E1X
334 *
335 GTO 12
336+LBL 11
337 500
338 RCL 09
339 X<=Y?
340 GTO 13
341 800
342 RCL 09
343 X<=Y?
344 GTO 14
345 2000
346 RCL 09
347 X<=Y?
348 GTO 15
349 5000
350 RCL 09
351 X<=Y?
352 GTO 16
353 8000
354 X<=Y?
355 RCL 09
356 X<=Y?
357 GTO 17
358 .0049
359 RCL 09
360 .3326
361 Y1X
362 *
363 GTO 18
364+LBL 13
365 .0493
366 RCL 09
367 .0001
368 *
369 E1X

Fine del cálculo de la Figura 6 para 1.5"

Cálculo de la Figura 10 para 2"

370 *
371 GTO 18
372*LBL 14
373 .0174
374 .0055
375 RCL 09
376 LN
377 *
378 +
379 GTO 18
380*LBL 15
381 .0464
382 RCL 09
383 9.5806 E-6
384 *
385 +
386 GTO 18
387*LBL 16
388 .0553
389 RCL 09
390 .0001
391 *
392 E[↑]X
393 *
394 GTO 18
395*LBL 17
396 .0646
397 RCL 09
398 3.9643 E-6
399 *
400 +
401*LBL 18
402 STO 03
403 40
404 RCL 04
405 X<=Y?
406 GTO 19
407 65
408 RCL 04
409 X<=Y?
410 GTO 20

Fin del cálculo de la figura 10 para 2"

Cálculo de la figura 6 para 2"

411 80
412 RCL 04
413 XC=Y?
414 CTO 21
415 -26.4333
416 RCL 04
417 1.64
418 *
419 +
420 CTO 12
421*LBL 19
422 82.9929
423 RCL 04
424 .6157
425 *
426 *
427 CTO 12
428*LBL 20
429 189.5573
430 RCL 04
431 .0011
432 *
433 EYX
434 *
435 CTO 12
436*LBL 21
437 187.0786
438 RCL 04
439 .0002
440 *
441 EYX
442 *
443*LBL 12
444 MRC

Fin del calculo de la Figura 6 para 2"

CALCULO DE LAS FIGURAS 7 Y 11

SILLAS BERL DE CERAMICA

01•LBL "0C"
02 FS?C 01
03 GTO 09
04 FS?C 02
05 GTO 10
06 5000
07 RCL 09
08 X<=Y?
09 GTO 13
10 0000
11 RCL 09
12 X<=Y?
13 GTO 14
14 .0053
15 RCL 09
16 .3033
17 Y↑X
18 •
19 GTO 15
20•LBL 13
21 .9827
22 RCL 09
23 7.0030 E-6
24 •
25 +
26 GTO 15
27•LBL 14
28 .0606
29 RCL 09
30 3.6466 E-5
31 •
32 E↑X
33 •
34•LBL 15
35 STO 03
36 50
37 RCL 04
38 X<=Y?
39 GTO 16
40 85
41 RCL 04

↓
Cálculo de la figura 11 para 0.5"

Fin del cálculo de la figura 11 para 0.5"

↓
Cálculo de la figura 7 para 0.5"

42 X<=Y?
43 GTO 17
44 -140.1
45 RCL 04
46 2.22
47 *
48 +
49 GTO 12
50 *L6L 16
51 24.89
52 RCL 04
53 .5737
54 *
55 +
56 GTO 12
57 *L6L 17
58 56.0667
59 RCL 04
60 .0012
61 *
62 E1X
63 *
64 GTO 12
65 *L6L 09
66 500
67 RCL 09
68 X<=Y?
69 GTO 13
70 000
71 RCL 09
72 X<=Y?
73 GTO 14
74 2000
75 RCL 09
76 X<=Y?
77 GTO 15
78 5000
79 RCL 09
80 X<=Y?
81 GTO 16
82 10000

Fin del cálculo de la Figura 7 para 0.5°

Cálculo de la Figura 11 para 1°

83 RCL 09
84 X=Y?
85 GTO 17
86 .0014
87 RCL 09
88 .444
89 Y+X
90 *
91 GTO 18
92*LBL 13
93 .0193
94 RCL 09
95 1.7071 E-5
96 *
97 +
98 GTO 18
99*LBL 14
100 -.041
101 .0111
102 RCL 09
103 LN
104 *
105 +
106 GTO 18
107*LBL 15
108 .0024
109 RCL 09
110 .3885
111 Y+X
112 *
113 GTO 18
114*LBL 16
115 .0031
116 RCL 09
117 .3566
118 Y+X
119 *
120 GTO 18
121*LBL 17
122 .051
123 RCL 09

124 4.3284 E-5

125 *

126 ETX

127 *

128•LBL 18

129 STO 08

130 25

131 RCL 04

132 X<=Y?

133 GTO 19

134 35

135 RCL 04

136 X<=Y?

137 GTO 20

138 55

139 RCL 04

140 X<=Y?

141 GTO 21

142 85

143 RCL 04

144 X<=Y?

145 GTO 22

146 -140.1

147 RCL 04

148 2.22

149 *

150 +

151 GTO 12

152•LBL 19

153 14.61

154 RCL 04

155 2.018

156 *

157 +

158 GTO 12

159•LBL 20

160 314.2614

161 -75.5629

162 RCL 04

163 LN

164 *

Inicio del cálculo de la figura 11 parte 1"

Inicio del cálculo de la figura 7 parte 1"

165 +
166 GTO 12
167 * LBL 21
168 41.4816
169 RCL 04
170 .0534
171 Y1X
172 *
173 GTO 12
174 * LBL 22
175 57.516
176 RCL 04
177 -.0015
178 *
179 E1X
180 *
181 GTO 12
182 * LBL 10
183 600
184 RCL 09
185 X<=Y?
186 GTO 13
187 4000
188 RCL 09
189 X<=Y?
190 GTO 14
191 10000
192 RCL 09
193 X<=Y?
194 GTO 15
195 .0014
196 RCL 09
197 .444
198 Y1X
199 *
200 GTO 16
201 * LBL 13
202 .0221
203 RCL 09
204 1.9714 E-5
205 *

Fin del cálculo de la figura 7 parte 1"

Cálculo de la figura "parte 5"

206 +
207 GTO 16
208 LBL 14
209 .0027
210 RCL 09
211 .3735
212 Y↑X
213 •
214 GTO 16
215 LBL 15
216 .046
217 RCL 09
218 3.6603 E-6
219 •
220 +
221 LBL 16
222 STO 03
223 20
224 RCL 04
225 X<=Y?
226 GTO 17
227 35
228 RCL 04
229 X<=Y?
230 GTO 18
231 55
232 RCL 04
233 X<=Y?
234 GTO 19
235 70
236 RCL 04
237 X<=Y?
238 GTO 20
239 85
240 RCL 04
241 X<=Y?
242 GTO 21
243 -127.6
244 RCL 04
245 2.22
246 •

fin del cálculo de la figura 11 para 1.5"

Cálculo de la figura 7 para 1.5"

247 +
248 GTO 12
249 *LBL 17
250 78.705
251 -7.4584
252 RCL 04
253 LN
254 *
255 +
256 GTO 12
257 *LBL 18
258 50.08
259 RCL 04
260 .448
261 *
262 +
263 GTO 12
264 *LBL 19
265 62.56
266 RCL 04
267 .0017
268 *
269 E1X
270 *
271 GTO 12
272 *LBL 20
273 66.087
274 RCL 04
275 .0005
276 *
277 E1X
278 *
279 GTO 12
280 *LBL 21
281 111.25
282 RCL 04
283 -.58
284 *
285 +
286 *LBL 12
287 MFC

Fin del cálculo de la Figura. 7 para 1.5"

CALCULO DE LAS FIGURAS 8 Y 12

ANILLOS FALL DE METAL

01•LBL 00
02 FS?C 01
03 GTO 09
04 FS?C 02
05 GTO 10
06 FS?C 03
07 GTO 11
08 500
09 PCL 09
10 X<=Y?
11 GTO 13
12 5000
13 RCL 09
14 X<=Y?
15 GTO 14
16 8000
17 RCL 09
18 X<=Y?
19 GTO 15
20 20000
21 RCL 09
22 X<=Y?
23 GTO 16
24 .0001
25 RCL 09
26 .7181
27 Y↑X
28 •
29 GTO 17
30•LBL 13
31 .1000
32 RCL 09
33 -.1912
34 Y↑X
35 •
36 GTO 17
37•LBL 14
38 .0259
39 RCL 09
40 8.3510 E-6
41 •

→
Cálculo de la Figura 12 para 0.5"

42 +
43 GTO 17
44 LBL 15
45 .0009
46 RCL 09
47 .5113
48 Y↑X
49 *
50 GTO 17
51 LBL 16
52 .0002
53 RCL 09
54 .653
55 Y↑X
56 *
57 LBL 17
58 STO 08
59 55
60 RCL 04
61 X<=Y?
62 GTO 18
63 65
64 RCL 04
65 X<=Y?
66 GTO 19
67 75
68 RCL 04
69 X<=Y?
70 GTO 20
71 85
72 RCL 04
73 X<=Y?
74 GTO 21
75 -16.9
76 RCL 04
77 .82
78 *
79 +
80 GTO 12
81 LBL 18
82 41.1139

fin del cálculo de la figura 12 para 0.5"

Cálculo de la figura 8 para 0.5"

83 RCL 04
84 .7479
85 *
86 +
87 GTO 12
88*LBL 19
89 96.5436
90 RCL 04
91 -.0036
92 *
93 E+X
94 *
95 GTO 12
96*LBL 20
97 139.6667
98 RCL 04
99 -.97
100 *
101 +
102 GTO 12
103*LBL 21
104 212581.8118
105 RCL 04
106 -1.8695
107 Y+X
108 *
109 GTO 12
110*LBL 09
111 0000
112 RCL 09
113 X<=Y?
114 GTO 13
115 20000
116 RCL 09
117 X<=Y?
118 GTO 14
119 .0347
120 RCL 09
121 3.2114 E-6
122 *
123 +

Fin del cálculo de la Figura 8 para 0.5"

Cálculo de la Figura 12 para 1"

124 GTO 15
125 * LBL 13
126 .0395
127 RCL 09
128 3.3538 E-6
129 *
130 +
131 GTO 15
132 * LBL 14
133 .0583
134 RCL 09
135 3.3875 E-5
136 *
137 ETX
138 *
139 * LBL 15
140 STO 08
141 20
142 RCL 04
143 X<=Y?
144 GTO 16
145 30
146 RCL 04
147 X<=Y?
148 GTO 17
149 40
150 RCL 04
151 X<=Y?
152 GTO 18
153 55
154 RCL 04
155 X<=Y?
156 GTO 19
157 70
158 RCL 04
159 X<=Y?
160 GTO 20
161 80
162 RCL 04
163 X<=Y?
164 GTO 21

Fin del cálculo de la figura 12 para "1"

Cálculo de la figura B para "1"

165 186.5824
166 -31.3218
167 RCL 04
168 LM
169 •
170 +
171 GTO 12
172•LBL 16
173 76.8965
174 -6.7786
175 RCL 04
176 LM
177 •
178 +
179 GTO 12
180•LBL 17
181 -44.5452
182 34.4854
183 RCL 04
184 LM
185 •
186 +
187 GTO 12
188•LBL 18
189 57.4038
190 RCL 04
191 .0632
192 YTX
193 •
194 GTO 12
195•LBL 19
196 86.04
197 RCL 04
198 -.304
199 •
200 +
201 GTO 12
202•LBL 20
203 99.1
204 RCL 04
205 -.542

206 *
207 +
208 GTO 12
209•LBL 21
210 21718.0696
211 RCL 04
212 -1.3824
213 Y↑X
214 *
215 GTO 12
216•LEL 10
217 500
218 RCL 09
219 X<=Y?
220 GTO 13
221 800
222 RCL 09
223 X<=Y?
224 GTO 14
225 2000
226 RCL 09
227 X<=Y?
228 GTO 15
229 5000
230 RCL 09
231 X<=Y?
232 GTO 16
233 8000
234 RCL 09
235 X<=Y?
236 GTO 17
237 .0009
238 RCL 09
239 .5184
240 Y↑X
241 *
242 GTO 18
243•LBL 13
244 .0295
245 RCL 09
246 .0005

↑ inicio del cálculo de la figura 8 para 1"

↓ Cálculo de la figura 12 para 1.5"

247 *
248 E1X
249 *
250 GTO 18
251 *LEL 14
252 .0306
253 RCL 09
254 .0004
255 *
256 E1X
257 *
258 GTO 13
259 *LBL 15
260 .0344
261 RCL 09
262 .0002
263 *
264 E1X
265 *
266 GTO 13
267 *LEL 16
268 .0036
269 RCL 09
270 .3619
271 Y1X
272 *
273 GTO 18
274 *LBL 17
275 -.1811
276 .0304
277 RCL 09
278 LH
279 *
280 +
281 *LBL 18
282 STO 08
283 35
284 RCL 04
285 X=Y?
286 GTO 19
287 85

Fin del cálculo de la figura 13 por 1.5"

Cálculo de la figura B por 1.5"

288 RCL 04
289 X<=Y?
290 GTO 20
291 -264
292 RCL 04
293 4.26
294 *
295 +
296 GTO 12
297 LBL 19
298 71.7267
299 RCL 04
300 .884
301 *
302 +
303 GTO 12
304 LBL 20
305 102.9365
306 RCL 04
307 -.0003
308 *
309 E+X
310 *
311 GTO 12
312 LBL 11
313 4000
314 RCL 09
315 X<=Y?
316 GTO 13
317 6000
318 RCL 09
319 X<=Y?
320 GTO 14
321 10000
322 RCL 09
323 X<=Y?
324 GTO 15
325 .0072
326 RCL 09
327 .2914
328 Y+X

Fin del cálculo de la figura B pieza 1.5"

Cálculo de la figura 12 pieza 2"

329 *
330 GTO 16
331 *LBL 13
332 .8447
333 RCL 09
334 8.7686 E-6
335 *
336 +
337 GTO 16
338 *LBL 14
339 -.1237
340 .8244
341 RCL 09
342 LN
343 *
344 +
345 GTO 16
346 *LBL 15
347 .0691
348 RCL 09
349 4.1893 E-5
350 *
351 E↑X
352 *
353 *LBL 16
354 STO 08
355 80
356 RCL 04
357 X<=Y?
358 GTO 17
359 119.2333
360 RCL 04
361 .28
362 *
363 +
364 GTO 12
365 *LBL 17
366 90.1287
367 11.8874
368 RCL 04
369 LN

Fin del cálculo de la figura 12 para 2°

Cálculo de la figura 8 para 2°

370 *
371 +
372 *LBL 12
373 MRG

Fine del cálculo de la figura B por 20



PARTE FINAL DEL PROGRAMA

01 LEL *BF2* ----- Tercera parte del programa
02 STO 07 ----- Ψ
03 *DT = ?*
04 PROMPT
05 .3948
06 /
07 RCL 01
08 Y↑X
09 ST* 07 ----- $\Psi (D_0 / 0.3048)^2$
10 *ZF = ?*
11 PROMPT
12 3.048
13 /
14 3
15 1/X
16 Y↑X
17 ST* 07 ----- $\Psi (D_0 / 0.3048)^2 (Z_0 / 3.048)^{1/3}$
18 .45
19 Y↑X
20 STO 01 ----- $(Z_0 / 3.048)^{0.15}$
21 *DV = ?*
22 PROMPT
23 ST* 05 ----- ρ_{D_0}
24 *MV = ?*
25 PROMPT
26 RCL 05
27 /
28 SQRT
29 ST* 07 ----- $\Psi (D_0 / 0.3048)^2 (Z_0 / 3.048)^{1/3} (S_{c_0})^{0.5}$
30 RCL 09
31 STO 05 ----- $G / (737.34)$
32 *TSL = ?*
33 PROMPT
34 .0728
35 /
36 -.8
37 Y↑X
38 RCL 06
39 .091
40 /
41 .16

42 YTX
43 *
44 1000
45 RCL 03
46 /
47 1.25
48 YTX
49 *
50 RCL 05
51 *
52 RCL 02
53 YTX
54 ST/ 07
55 RCL 08
56 ST* 01
57 60
58 RCL 04
59 X<Y?
60 GTO 30
61 75
62 RCL 04
63 X<Y?
64 GTO 31
65 87.8553
66 RCL 04
67 X<Y?
68 GTO 32
69 .0535
70 RCL 04
71 .024
72 *
73 ETX
74 *
75 GTO 33
76 LBL 30
77 1.0204
78 RCL 04
79 -.0013
80 *
81 +
82 GTO 33

H_v

$\Phi(z_r/3.048)^{0.15}$

Calculo de la Figura 12

83*LEL 31
84 1.9882
85 RCL 04
86 -.0165
87 *
88 +
89 GTD 33
90*LEL 32
91 27199.6387
92 RCL 04
93 -2.4652
94 Y+X
95*LEL 33
96 ST* 01
97 "DL =?"
98 PROMPT
99 RCL 03
100 *
101 RCL 06
102 /
103 SORT
104 ST/ 01
105 "FA =?"
106 FROMPT
107 STO 02
108 RCL 01
109 *
110 RCL 07
111 +
112 RCL 02
113 LN
114 RCL 02
115 1
116 -
117 /
118 *
119 "HTP="

Fin del cálculo de la Figura 13

$$= C.f. (z_p / 3.048)^{0.15}$$

H_c

λ

120 ARCL X
121 AVIEW
122 END

Incógnita

Nomenclatura en la calculadora

| | |
|-----|-----------------------------|
| RC | anillos Raschig de cerámica |
| RM | anillos Raschig de metal |
| BC | sillas Berl de cerámica |
| PM | anillos Pall de metal |
| dL | pl |
| dV | pV |
| FP | Fp |
| ML | ml |
| L | L |
| V | V |
| UVS | Uvs |
| GL | G1 |
| DT | Dt |
| ZP | Zp |
| DV | Dv |
| MV | mv |
| TSL | σ1 |
| DL | D1 |
| FA | λ |

Incógnita

Nomenclatura en la calculadora

HTP

Htp

EXPLICACION DEL PROGRAMA

Este programa se divide en 3 partes.

La primera parte es el programa inicializado como " BF1 ".

La segunda parte consta de cuatro programas inicializados como " RC ", " RM ", " BC ", y " PM ", cada uno de estos cuatro programas calculan los parámetros de empaque para la transferencia de masa en la fase líquida y en la fase vapor para anillos Raschig de cerámica, anillos Raschig de metal, sillas Berl de cerámica y anillos Pall de metal respectivamente. Por problemas de espacio en la calculadora solo se podrá meter un solo programa de los cuatro anteriormente mencionados.

Al final del programa de " BF1 " se encuentra la instruccion " MRG " la cual se utiliza con el lector de tarjetas y sirve para encadenar programas hechos por

separado, esto es, la calculadora al llegar a la instrucción " MRG " preguntará el programa nuevo que se unirá al ya existente y correrá como si fuera una unidad (para una mayor explicación dirigirse al instructivo de operaciones de la lectora de tarjetas).

Al llegar al final del programa de " BF1 " se introducirá uno de los cuatro programas inicializados como " RC, RM, BC o PM " para que calcule los parámetros y por último se introducirá el programa inicializado como " BF2 " que es la parte final del programa completo.

El diagrama de la secuencia de como se deben meter los programas es el siguiente:

BF1 ... Programa
 inicial

RC o RM o BC o PM ... Programas
 secundarios

BF2 ... Programa
 final

El programa preguntará el valor para cada variable en la unidades correspondientes, se tecleara y se presionará la tecla " R/S " para que corra el programa, como resultado nos dará la altura de un plato teórico.

EJEMPLO

A continuación se dan los siguientes datos para que sirvan como ejercicio y para fines comparativos:

Berl de cerámica de 1.5 pulgadas

Densidad del líquido = 840 Kg / m³

Densidad del vapor = 0.472 Kg / m³

Factor de empaque = 213 m

Viscosidad del líquido = 2×10^{-3} Kg / (m s)

Flujo de líquido = 2.71 Kg / (m² s)

Flujo de vapor = 0.716 Kg / (m² s)

Velocidad superficial del vapor = 1.5169 m / s

Gasto másico de líquido = 2.71 Kg / (m² s)

Diámetro de la columna = 0.47 m

Altura de la cama empacada = 12,8 m

Difusividad del vapor = $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$

Viscosidad del vapor = $1 \times 10^{-4} \text{ g} / (\text{m s})$

Tensión superficial = $3 \times 10^{-3} \text{ Kg} / \text{s}^2$

Difusividad del líquido = $4,71 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$

Factor de absorción = 0,7022

Como resultado nos dará que la altura del plato teórico es igual a 6,8317 m.

NOMENCLATURA

a, b = exponentes en la ecuación de transferencia de masa en la fase líquida.

a_p = área superficial específica del empaque seco; Área superficial total del empaque dividida entre el volumen de empaque, metros cuadrados / metros cúbicos.

C_{f1} = coeficiente debido al efecto de aproximación al punto de inundación en la transferencia de masa de la fase líquida.

D_t = diámetro de la torre, metros.

D = coeficiente de difusión volumétrico, metro cuadrado / segundo.

F_r = relación de inundación a valores de L / V constantes.

F_s = factor de seguridad.

F_p = factor de empaque determinado empíricamente.
1 / metro.

f_m = factor de corrección para viscosidades.

f_p = factor de corrección para densidades.

f_σ = factor de corrección para tensiones

superficiales.

G = masa velocidad basada en el área seccional de la columna, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

G_{vsf} = masa velocidad superficial del vapor a la inundación, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

G_m = velocidad molar del vapor, moles / (segundo, metro cuadrado).

g = constante gravitacional.

H_{ov} = altura general de una unidad de transferencia (HTU) en terminos de la composición del vapor, metros.

H_{tp} = altura de un plato teórico (HEF), metros.

H = altura de una unidad de transferencia, metros.

L = flujo de líquido, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

L_m = velocidad molar del líquido, moles / (segundo, metro cuadrado).

m = pendiente de la curva de equilibrio, y / x .

U_{vs} = velocidad del vapor basada en el área superficial, metros / segundo.

V = flujo de vapor, kilogramos / (segundo, metro cuadrado).

Z_p = altura de la cama empacada. metros.

SUBFIJOS

l = líquido

v = vapor

w = agua

LETRAS GRIEGAS

t = espacio vacío, sin empaque.

λ = $m \text{ Gm} / \text{Lm}$, factor de absorción.

m = viscosidad, kilogramos / (metro. segundo).

Ψ = parámetro de empaque para la transferencia de masa en la fase líquida, metros.

Φ = parámetro de empaque para la transferencia de masa en la fase vapor, metros.

ρ = densidad, kilogramos / metro cúbico.

CONCLUSION

En general, las correlaciones derivadas de sistemas binarios se aplican igualmente bien para sistemas multicomponentes, y correlaciones derivadas para tipos individuales de platos, por ejemplo de cachucha y válvula.

En general, la eficiencia del plato desciende cuando el flujo de vapor a través de los orificios se reduce al punto de descarga y para áreas abiertas del plato mayores al 30 %. Las eficiencias mas altas se obtienen en areas de los orificios abiertas de un 20 a un 25 porciento y son obtenidas para condiciones de operación que fluctuan entre el 85 a el 95 porciento del punto de inundación del plato.

El método recomendado por el " American Institute of Chemical Engineers " se basa en un modelo de doble película para la transferencia de masa y la relación de todas las eficiencias con las concentraciones en la fase gaseosa. Se incluye una corrección para la eficiencia de Murphree por efectos de arrastre. Este método se baso en pequeñas columnas con platos de cachucha en un régimen espumante. Puede que no sea satisfactoriamente bueno para columnas con diámetros muy grandes, donde la eficiencia decrece debido a que puede haber un mal mezclado en el

líquido. Este método no es bueno para platos de flujo cruzado debido a la complejidad del diseño hidrodinámico envuelto. El método de el A.I.Ch.E. no es bueno para sistemas donde la fase controlante es la fase líquida como en columnas de absorción y agotadoras.

La correlación es insatisfactoria para sistemas cuyas propiedades y flujos de vapor y líquido son inusuales o raras. No provee la manera para determinar los efectos del paso del líquido o vapor, lo cual es importante para valores inusuales de K , particularmente en combinación con condiciones extremas de V / L . El método no debe usarse para sistemas que operan cerca del punto de inundación, o cuando se dispone de muchos datos empíricos. El método da resultados razonablemente buenos para platos de válvula con tubería y ha tenido validez para platos de cachucha.

Las torres empacadas se han usado por muchos años a poca escala para separar: materiales corrosivos a los metales, sistemas donde la caída de presión se debe mantener baja como en los sistemas de destilación a vacío, donde la retención debe ser baja como en el destilación batch, donde el diámetro de la columna es pequeño, y donde

valores muy grandes de platos teóricos o unidades de transferencia se deben obtener a relativamente poca altura a pequeña escala.

Recientemente, las torres empacadas se han usado a gran escala para operaciones vapor-líquido de todos tipos debido a sus ventajas en economía y exactitud.

BIBLIOGRAFIA

Manual del Ingeniero Químico,
Robert H. Perry y Cecil H. Chilton,
McGraw-Hill.

Operaciones de transferencia de masa,
Robert E. Treybal,
McGraw-Hill.

Unit Operations of Chemical Engineering,
Warren L. McCabe y Julian C. Smith,
McGraw-Hill.

Separation Process,
C. J. King,
McGraw-Hill.

Chemical Engineering Science,
S. Bakowski,
Vol. 1, Noviembre 6, 1952, p. 266.

The Chemical Engineering,

G. L. Standart,

Noviembre 1974, p. 716.

Distillation,

M. VanWinkle,

McGraw-Hill.

Design of Equilibrium Stage Processes,

B. D. Smith,

McGraw-Hill.

Hydrocarbon Processing,

S. A. MacFarland, P. M. Sigmund y M. VanWinkle,

Vol. 51, No. 7, Julio 1972, p. 111.

Chemical Engineering,

G. E. English y M. VanWinkle,

Vol. 70, No. 23, Noviembre 11, 1963, p. 241.

Chemical Engineering,

anonimo,

Vol. 61, No. 3, Marzo 1954, p. 122.

The Elements of Fractional Distillation,

C. S. Robinson y E. R. Guilliland,

McGraw-Hill.

Chemical Engineering,

anonimo,

Vol. 62, Agosto 1955, p. 116.

Hydrocarbon Processing,

M. W. Biddulph,

Vol. 56, No.10, Octubre 1977, p. 145.

British Chemical Engineering,

P. Foldes e I. Evangelidi,

Vol. 13, No. 9, 1968, p. 1291.

British Chemical Engineering,
P. E. Barker y M. H. Choudhury,
Vol. 4, Junio 1959, p. 358.

The Canadian Journal of Chemical Engineering,
B. B. Pruden, W. Hayduk y H. Laudie.
Vol. 52, Febrero 1974, p. 64.

Chemical Engineering,
O. Frank,
Vol. 84, No. 6, Marzo 14, 1977, p. 111.

Chemical Engineering,
W. L. Bolles y J. R. Fair,
Vol. 89, No. 14, Julio 12, 1982, p. 109.

Chemical Engineering Science,
H. A. C. Thijssen,
Vol. 4, 1955, p. 81.

Chemical Engineering Science.

A. Tane y H. Sawistawski.

Vol. 23, 1968, p. 943.

British Chemical Engineering,

M. Huml y G. Standart,

Vol. 11, No. 11, 1966, p. 1370.