

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**NOMOGRAMAS  
EMPLEADOS**

**EN EL DISEÑO  
DE TORRES DE  
ABSORCION Y  
DESTILACION**

**M O N O G R A F I A**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N  
ANGEL ALFONSO DE LA LAMA  
SALVADOR EGUIARTE CH.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**A MIS PADRES**

Sr. Salvador Eguiarte Valdés

Sra. Guadalupe Chapela de Eguiarte  
gula, esfuerzo e impulso.

**A MIS HERMANAS**

Silvia y Sonia Patricia

carifio y apoyo

**A MIS TIOS Y PRIMOS**

prudencia y experiencia

**A MIS MAESTROS**

luz y sabiduría

**A MI ESPOSA**

Lucía María

vida, alegría, bondad, amor,

compañía...

## INDICE DE TEMAS

| CLAVE      | TEMA   | Página |
|------------|--|--------|
|            | INTRODUCCION. . . . .                                  | 1      |
| a. *       | Breve explicación sobre la nomografía. . . . .         | 1      |
| b. *       | Representación y cálculo gráfico. . . . .              | 2      |
| c. *       | Cálculo nomográfico. . . . .                           | 4      |
| d. *       | Relación básica entre gráfica y nomograma. . . . .     | 6      |
|            | CAPITULO I. . . . .                                    | 8      |
| 1. 1. -    | Definición y ejemplo de módulo. . . . .                | 9      |
| 1. 2. -    | Nomogramas del tipo adición. . . . .                   | 10     |
| 1. 2. a. - | Tipo $f(x) + F(y) + 0(z) + u(w)$ . . . . .             | 10     |
| 1. 2. b. - | Tipo $1/f(x) + 1/F(y) + 1/0(z)$ . . . . .              | 11     |
| 1. 2. c. - | Construcción de escalas. . . . .                       | 13     |
| 1. 2. d. - | Graduación de escalas. . . . .                         | 13     |
| 1. 2. e. - | Longitud de las líneas que marcan las escalas. . . . . | 14     |
| 1. 2. f. - | Posición de las líneas que marcan las escalas. . . . . | 15     |
| 1. 2. g. - | Leyendas. . . . .                                      | 15     |
| 1. 3. -    | Cartas logarítmicas. . . . .                           | 15     |
| 1. 3. a. - | Tipo $f(x) + F(y) + 0(z)$ . . . . .                    | 15     |
| 1. 3. b. - | Métodos de construcción de escalas. . . . .            | 16     |

| CLAVE | TEMA | Página |
|-------|------|--------|
|-------|------|--------|

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 1. 3. c. - | Tipo $f(x) = F(y) = G(z) = u(w)$ . . . . .                        | 18 |
| 1. 3. d. - | Intervalos en las escalas logarítmicas. . . . .                   | 19 |
| 1. 3. e. - | Numeración de las escalas. . . . .                                | 20 |
| 1. 3. f. - | Aproximación de las graduaciones. . . . .                         | 20 |
| 1. 4. -    | Combinación de cartas. . . . .                                    | 21 |
| 1. 4. a. - | Uso de líneas paralelas de referencia. . . . .                    | 21 |
| 1. 4. b. - | Combinación de tipos de cartas de adición y logarítmicas. . . . . | 22 |
| 1. 4. c. - | Nomogramas de líneas concurrentes. . . . .                        | 23 |

**CAPITULO II.**

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 2. -       | Nomogramas usados en destilación. . . . .   | 25 |
| 2. 1. -    | Nomogramas usados para encontrar la relación de <u>a'</u> equilibrio entre fases. . . . .               | 26 |
| 2. 1. a. - | Equilibrio vapor líquido y conversiones. . . . .  | 27 |
| 2. 1. b. - | Volatilidad relativa para mezclas ideales. . . . .  | 30 |
| 2. 1. c. - | Volatilidad relativa para mezclas ideales binarias. . . . .   | 32 |
| 2. 1. d. - | Constante de equilibrio. . . . .  | 35 |
| 2. 1. e. - | Temperatura de ebullición a presiones de vapor para bajas presiones. . . . .                            | 39 |
| 2. 1. f. - | Coefficientes de actividad para obtener las composiciones vapor líquido en sistemas no ideales. . . . . | 42 |
| 2. 1. g. - | Equilibrio vapor líquido en sistemas ternarios. . . . .   | 50 |
| 2. 2. -    | Destilación instantánea (flash). . . . .  | 53 |
| 2. 3. -    | Destilación instantánea (flash) para multicomponen  | 54 |

| CLAVE       | TEMA  | Página |
|-------------|---|--------|
| 2. 2. b.    | Destilación instantánea (flash) para multicomponentes. . . . .                  | 60     |
| 2. 2. c.    | Vaporización instantánea (flash) de aceites. . . . .                            | 64     |
| 2. 3.       | Destilación intermitente. . . . .   | 68     |
| 2. 3. a.    | Cálculo de las composiciones del residuo. . . . .                               | 69     |
| 2. 3. b.    | Destilación por arrastre de vapor en un proceso intermitente. . . . .           | 73     |
| 2. 3. c.    | Destilación intermitente para mezclas binarias o de multicomponentes. . . . .   | 76     |
| 2. 4.       | Rectificación. . . . .  | 79     |
| 2. 4. A.    | Reflujo mínimo. . . . .   | 80     |
| 2. 4. A. a. | Cálculo de la relación de reflujo mínimo. . . . .                               | 81     |
| 2. 4. A. b. | Relación de reflujo mínimo en la separación de una mezcla de gas ideal. . . . . | 83     |
| 2. 4. A. c. | Relación de reflujo. . . . .  | 86     |
| 2. 4. B.    | Número mínimo de platos teóricos. . . . .                                       | 89     |
| 2. 4. B. a. | Número mínimo de platos teóricos a reflujo total. . . . .                       | 90     |
| 2. 4. B. b. | Número mínimo de platos teóricos a reflujo total. . . . .                       | 93     |
| 2. 4. B. c. | Número mínimo de platos teóricos. . . . .                                       | 96     |
| 2. 4. B. d. | Número de platos teóricos para multicomponentes. . . . .                        | 100    |
| 2. 4. C.    | Eficiencia de platos. . . . .   | 103    |
| 2. 4. C. a. | Eficiencia total de plato. . . . .  | 104    |
| 2. 4. D.    | Altura de sello. . . . .  | 106    |

| CLAVE    | TEMA  | Página |
|----------|---|--------|
| 2.4.D.a. | Altura del líquido sobre el vertedero para platos perforados. . . . .   | 107    |
| 2.4.D.b. | Altura del sello del líquido para una torre de mamparas perforadas. . . . .   | 109    |
| 2.4.E.   | Distancia entre platos. . . . .   | 112    |
| 2.4.E.a. | Distancia mínima entre platos, cuando la entrada de líquido es limitante, para platos de flujo cruzado, con baja área perforada. . . . .  | 113    |
| 2.4.E.b. | Distancia mínima entre platos, cuando la entrada de líquido es limitante, para platos de flujo cruzado, con media área perforada. . . . . | 116    |
| 2.4.E.c. | Distancia mínima entre platos, cuando la entrada de líquido es limitante, para platos de flujo cruzado, con alta área perforada. . . . .  | 119    |
| 2.4.E.d. | Distancia mínima entre platos, cuando la entrada de líquido es limitante, para platos de doble paso. . . . .                              | 122    |
| 2.4.E.e. | Distancia entre mamparas. . . . .   | 125    |
| 2.4.F.   | Alimentación. . . . .   | 128    |
| 2.4.F.a. | Alimentación para una torre de platos perforados. . . . .   | 129    |
| 2.4.G.   | Diámetro de la torre. . . . .   | 132    |
| 2.4.G.a. | Diámetro de la columna. . . . .   | 133    |
| 2.4.G.b. | Estimación del diámetro de torres de destilación. . . . .   | 138    |
| 2.4.G.c. | Diámetro mínimo cuando la entrada es limitante. . . . .   | 142    |
|          | Distancia entre mamparas perforadas. . . . .  | 144    |

| CLAVE        | TEMA   | Página |
|--------------|--|--------|
| 2. 4. II. a. | Área perforada en mamparas. . . . .  | 148    |
| 2. 4. II. b. | % de área abierta en una torre de mamparas -<br>perforadas. . . . .                    | 151    |
| 2. 4. I.     | Velocidad permisible del vapor. . . . .  | 153    |
| 2. 4. I. a.  | Velocidad máxima permisible del vapor, en to-<br>rres de platos con cachuchas. . . . . | 154    |
| 2. 4. J.     | Caída de presión. . . . .  | 157    |
| 2. 4. J. a.  | Caída de presión en plato seco para platos per-<br>forados. . . . .                    | 158    |
| 2. 4. K.     | Cálculo de las cachuchas. . . . .  | 161    |
| 2. 4. K. a.  | Altura de la ranura de las cachuchas. . . . .  | 162    |
|              | CAPITULO III. . . . .  | 166    |
| 1.           | Absorción. . . . .   | 166    |
| 1. 1.        | Factor de absorción. . . . .   | 167    |
| 1. 1. a.     | Factor de absorción. . . . .   | 168    |
| 1. 2.        | Número de unidades de transferencia. . . . .   | 172    |
| 1. 2. a.     | Gradiente medio logarítmico en problemas difu-<br>sionales. . . . .                    | 173    |
| 1. 2. b.     | Gradiente medio logarítmico en problemas difu-<br>sionales. . . . .                    | 177    |
| 1. 2. c.     | Gradiente medio logarítmico en problemas difu-<br>sionales. . . . .                    | 180    |
| 1. 3.        | Altura de la torre. . . . .  | 183    |
| 1. 3. a.     | Altura de la torre empacada. . . . .   | 184    |
| 1. 4.        | Factor de inundación. . . . .  | 187    |



| CLAVE  | TEMA  | Página |
|--------|---|--------|
| 3.4.a. | Factor de inundación para torres empacadas. . . | 188    |
| 3.5.   | Diámetro de la torre . . . . .                  | 192    |
| 3.5.a. | Diámetro de la columna empacada. . . . .        | 193    |

## INDICE DE FIGURAS

| FIGURA | TEMA   | Página |
|--------|--|--------|
| 1      | Representación de 2 ecuaciones en coordenadas cartesianas. . . . . | 4      |
| 2      | Representación nomográfica de una ecuación. . . . .                | 5      |
| 3      | Nomograma combinando líneas rectas y curvas. . . . .               | 5      |
| 4      | Gráfica de una ecuación. . . . .                                   | 6      |
| 5      | Nomograma de la misma ecuación. . . . .                            | 6      |
| 6      | Nomograma tipo adición: $f(x) + F(y) + \phi(z) + u(w)$ . . . . .   | 11     |
| 7      | Nomograma tipo adición $1/f(x) + 1/F(y) + 1/\phi(z)$ . . . . .     | 12     |
| 8      | Método de construcción de escalas logarítmicas. . . . .            | 17     |
| 9      | Ejemplo de la aproximación de las escalas. . . . .                 | 21     |
| 10     | Uso de las líneas paralelas de referencia. . . . .                 | 22     |
| 11     | Combinación de cartas. . . . .                                     | 23     |
| 12     | Ejemplo de nomograma de líneas concurrentes. . . . .               | 24     |
| 13     | Nomograma del 2. 1. a. . . . .                                     | 29     |
| 14     | Nomograma del 2. 1. b. . . . .                                     | 31     |
| 15     | Nomograma del 2. 1. c. . . . .                                     | 34     |
| 16     | Nomograma del 2. 1. d. . . . .                                     | 37     |
| 17     | Nomograma del 2. 1. d. . . . .                                     | 38     |
| 18     | Nomograma del 2. 1. e. . . . .                                     | 41     |

| FIGURA | TEMA                              | Página |
|--------|-----------------------------------|--------|
| 42     | Nomograma del 2. 4. E. a. . . . . | 127    |
| 43     | Nomograma del 2. 4. F. a. . . . . | 131    |
| 44     | Nomograma del 2. 4. G. a. . . . . | 137    |
| 45     | Nomograma del 2. 4. G. b. . . . . | 141    |
| 46     | Nomograma del 2. 4. G. c. . . . . | 143    |
| 47     | Nomograma del 2. 4. G. d. . . . . | 146    |
| 48     | Nomograma del 2. 4. H. a. . . . . | 150    |
| 49     | Nomograma del 2. 4. H. b. . . . . | 152    |
| 50     | Nomograma del 2. 4. I. a. . . . . | 156    |
| 51     | Nomograma del 2. 4. J. a. . . . . | 160    |
| 52     | Nomograma del 2. 4. K. a. . . . . | 164    |
| 53     | Nomograma del 2. 4. K. a. . . . . | 165    |
| 54     | Nomograma del 3. 1. a. . . . .    | 170    |
| 55     | Nomograma del 3. 1. a. . . . .    | 171    |
| 56     | Nomograma del 3. 2. a. . . . .    | 176    |
| 57     | Nomograma del 3. 2. b. . . . .    | 179    |
| 58     | Nomograma del 3. 2. c. . . . .    | 182    |
| 59     | Nomograma del 3. 3. a. . . . .    | 186    |
| 60     | Nomograma del 3. 4. a. . . . .    | 191    |
| 61     | Nomograma del 3. 5. a. . . . .    | 196    |

## REFERENCIAS

| Figura | Referencia   |
|--------|--|
| 1.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 2.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 3.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 4.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 5.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 6.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 7.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 8.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 9.     | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 10.    | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 11.    | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 12.    | Nomography & empirical equations Davis D. S.         |
| 13.    | Karabanda pág. 147.                                  |
| 14.    | Karabanda pág. 143.                                  |
| 15.    | Karabanda pág. 145.                                  |
| 16.    | Petroleum Refiner Feb. 1957 Vol. 36 pág. 167.        |
| 17.    | Petroleum Refiner Feb. 1957 Vol. 36 pág. 167.        |
| 18.    | Afinidad Sept.-Oct. 1957 No. 178 pág. 199.           |
| 19.    | Chem. Eng. Progress Enero 1950 Vol. 46 pág. 44 - 47. |
| 20.    | Chem. Eng. Progress Enero 1950 Vol. 46 pág. 46 - 47. |

## Figura

## Referencia

21. British Chem. Eng. Jun. 1963 Vol. 13 No. 6 pág. 849.
22. Petroleum Refiner Marzo 1953 Vol. 32 PÁg. 120.
22. Petroleum Refiner Marzo 1953 Vol. 32 PÁg. 121.
23. Petroleum Refiner Junio 1947 Vol. 19 PÁg. 431.
24. Petroleum Refiner Abril 1956 Vol. 35 PÁg. 200.
25. Karabanda PÁg. 157.
26. Karabanda PÁg. 159.
27. Ind. & Eng. Chem. Vol. 39 No. 4. PÁg. 1042.
28. Petroleum Refiner. Junio 1963 Vol. 42 PÁg. 151.
29. Karabanda PÁg. 153.
30. Hydrocarbon Processing Mayo 1968 Vol. 47 PÁg. 170.
31. Revista de la Sociedad Química de México. Vol. 1 PÁg. 121
32. Chem. Eng. Feb. 1955. PÁg. 182.
33. Petroleum Refiner Marzo 1928. PÁg. 156.
34. Chem. Eng. Abril 1948. PÁg. 125.
35. Petroleum Refiner Sept. 1955 Vol. 34 PÁg. 150.
36. Petroleum Refiner Feb. 1958 Vol. 37 PÁg. 104 - 118.
37. Petro/Chem Eng. Abril 1965 PÁg. 75.
39. Petroleum Refiner. Dic. Vol. 25 PÁg. 103 - 110.
39. Petroleum Refiner. Dic. Vol. 25 PÁg. 103 - 110.
40. Petroleum Refiner. Dic. Vol. 25 PÁg. 103 - 110.

## Figura

## Referencia

- 
42. Petro/Chem Engineer. Abril 1965 Pág. 75.
  43. Petroleum Refiner. Feb. 1958 Vol. 37 Pág. 104 - 118.
  44. Petroleum Refiner. Junio 1963 Vol. 42 Pág. 151 - 156.
  45. Ind. & Eng. Chem. Oct. 1961 Vol. 53 Pág. 453.
  46. Petroleum Refiner. Feb. 1958 Vol. 37 Pág. 104 - 118.
  47. Petro/Chem. Engineer. Abril 1965 Pág. 75.
  48. Petro/Chem. Engineer. Abril 1965 Pág. 75.
  49. Petro/Chem. Engineer. Abril 1965 Pág. 75.
  50. Karabanda. Pág. 149.
  51. Petroleum Refiner. Feb. 1958 Vol. 37 Pág. 104 - 118.
  52. Karabanda. Pág. 161.
  53. Karabanda. Pág. 162.
  54. Ind. & Eng. Chem. Dic. 1942 Vol. 34 Pág. 1499-1500.
  55. Ind. & Eng. Chem. Dic. 1942 Vol. 34 Pág. 1499-1500.
  56. Ind. & Eng. Chem. Oct. 1942 Vol. 34 Pág. 1200-1208.
  57. Ind. & Eng. Chem. Oct. 1942 Vol. 34 Pág. 1200-1208.
  58. Ind. & Eng. Chem. Oct. 1942 Vol. 34 Pág. 1200-1208.
  59. Petroleum Refiner. Sept. 1958 Vol. 37 Pág. 346.
  60. Hydrocarbon Processing Jun. 1969 Vol. 48 Pág. 154.
  61. Karabanda. Pág. 139.

## INTRODUCCION

a). Breve explicación sobre la nomografía:

Debido a la escasa información teórica acerca del cálculo nomográfico, no se ha llegado a obtener una definición clara y concisa, de lo que es un nomograma y lo que representa, por lo que sólo se dará una idea breve de lo que es.

Un nomograma, es la representación gráfica de una o varias ecuaciones, en su forma más simple, consta de tres escalas paralelas, graduadas de tal manera, que al unir con una línea recta dos valores en dos escalas diferentes, intersecta la tercera, satisfaciendo una ecuación dada. Este método tiene como característica: el ser esencialmente simple, rápido y exacto.

Aún cuando la nomografía está basada en los principios del plano geométrico, que han sido conocidos por centurias, su nacimiento y evolución fueron una necesidad del mundo de la Ingeniería. D'Ocagne es considerado el pionero en el trabajo de los nomogramas ya que estos datan del año 1890.

La complejidad de los cálculos está reflejada en el diseño y construcción de la carta nomográfica, pero no así en su uso, ya que es extremadamente sencillo.

Los nomogramas usualmente proporcionan directamente la respuesta, lo cual es una ventaja que contribuye significativamente a la exactitud de su uso, puesto que evitan operaciones y errores de ajuste. Pudiendo ser obtenidos casi cualquier grado de precisión deseada, cuando se pone la debida atención en el diseño de la carta, su tamaño y la graduación de los ejes.

### h). Cálculo Gráfico

Los métodos gráficos han proveído un valor incalculable en el análisis de los procesos a los que un Ingeniero Químico tiene que hacer frente, ya que muchos de los datos básicos están representados gráficamente, para lo cual se emplea el cálculo gráfico.

Los diferentes tipos de representaciones gráficas pueden ser empleadas según los siguientes propósitos:

1. Como ayuda a la visualización de un proceso, o a la interpretación de un resultado.
2. Para la representación de datos cuantitativos o teóricos o ecuaciones empíricas.
3. En la comparación de datos experimentales con datos teóricos o con ecuaciones empíricas.
4. Como significado de un cálculo.

En nuestra profesión es muy frecuente el uso del sistema cartesiano para la representación y solución de relaciones entre varias varia-



se mediante la ecuación  $y = 3x + 5$  ; otra, mediante la ecuación  $y = x^2 + 1$  ; y otra por  $y = -3x + 12$  . Estas tres ecuaciones están representadas gráficamente en la figura 1.

Es de hacer notar, que los valores en la abscisa de los puntos "P" y "Q" son los valores de "x", los cuales satisfacen las ecuaciones:  $y = 3x + 5$  y  $y = x^2 + 1$ , dado que los puntos "P" y "Q" son comunes a la parábola y a la línea recta. Lo mismo sucede con el punto "R" cuyo valor en la abscisa satisface las ecuaciones de las líneas rectas que lo cruzan.

Por otro lado, si "P" es una función de dos variables "x" y "y", una serie de resultados de "P" en términos de "x" puede ser obtenida para cada uno de los valores de "y", graficando los datos, serán representados por una familia de curvas, cada una de ellas representará una relación de "P" y "x" para un valor constante de "y".

Si otra variable está involucrada, podemos tener gráficas separadas para valores constantes de ésta, resultando una familia de curvas para cada uno de los valores dados a la variable.

La representación gráfica de resultados experimentales es usualmente el primer paso en la búsqueda de ecuaciones empíricas que representen el fenómeno estudiado. Aún, cuando la ecuación empírica es obtenida directamente de los datos tabulados por un proceso numérico, es conveniente graficar los puntos en orden, para que la naturaleza de la función pueda ser visualizada, y así poder adjudicarle una ecuación al fenómeno.

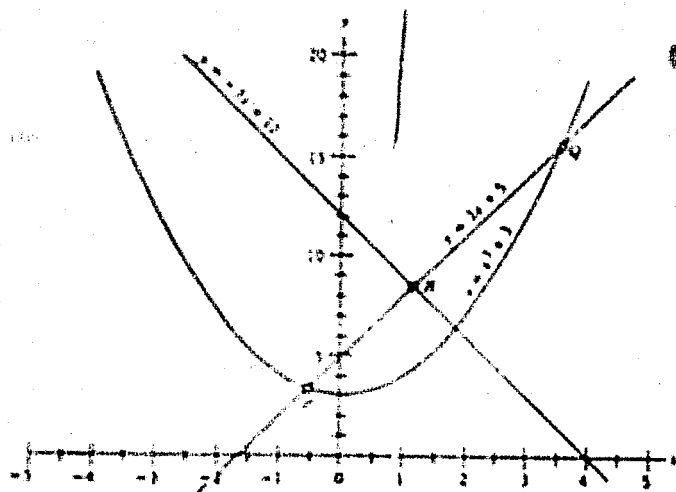


Figura 1. - Representación de las ecuaciones  $y = x^2 + 3$  ;  $y = 3x + 5$  ;  $y = -3x + 12$ , en coordenadas cartesianas.

c). - Cálculo nomográfico:

Para ilustrar la definición de nomograma, dada anteriormente, - tomemos como ejemplo la expresión  $x^2 + y^2 = r^2$ , que está representada por la figura 2, la línea punteada que une los valores  $x = 3$  y  $y = 4$ , interseca la escala "r", en  $r = 5$ .

Los nomogramas son más ventajosos en la solución de ecuaciones de tres, cuatro, cinco o más variables, especialmente cuando es repetido el uso de las ecuaciones.

La forma particular del nomograma dependerá de la ecuación dada, en muchos casos, escalas en línea recta se han encontrado muy satisfactorias; en otras serán necesarios escalas curvas especialmente aque-

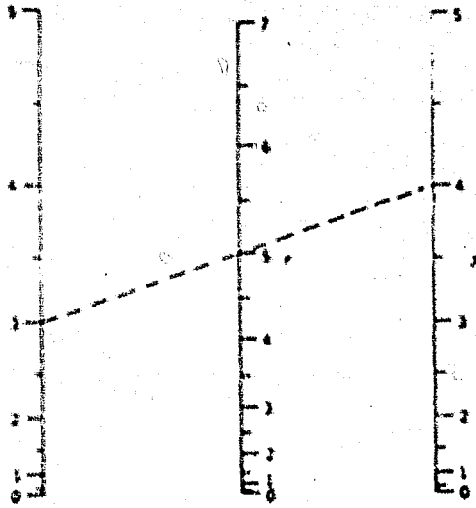


Figura 2. - Nomograma que representa la ecuación  $x^2 + y^2 = r^2$

nos nomogramas requieren una combinación de escalas rectas y curvas, lo cual está ilustrada en la figura 3.

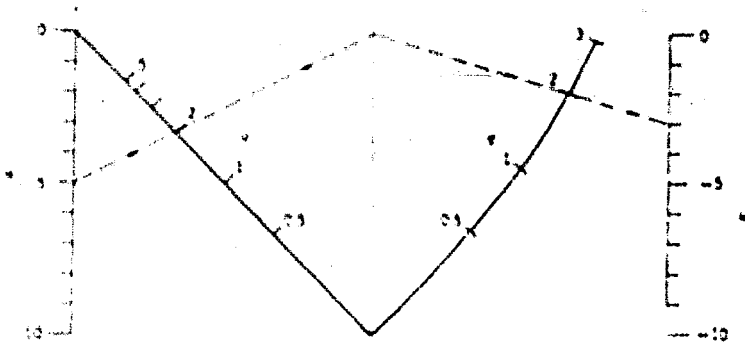


Figura 3. - Nomograma combinando líneas rectas y curvas, representa la ecuación  $uv + wq = q^2$

Las líneas punteadas indican que cuando  $u = 5$ ,  $v = 2$ ,  $q = 2$

obtenemos como resultado que  $w = -3$

d). - Relación básica entre gráficas y nomogramas:

Tanto en el cálculo gráfico como en el nomográfico, los resultados dependen de las escalas trazadas en los ejes de trabajo por lo que -- frecuentemente se confunden y son considerados lo mismo.

La relación básica entre gráficas y nomogramas es la siguiente: el cálculo gráfico usa las escalas en proporción directa e inmediata a segmento de línea o líneas y el nomograma usa las escalas en razón directa de los valores que estos representan. Para ilustrar lo anterior consideramos la figura 4, la cual muestra la gráfica de la ecuación:  $u + v = w$ , y la figura 5 que muestra el nomograma de la misma ecuación.

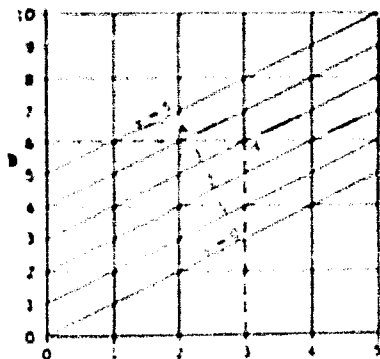


Figura 4. - Gráfica de la ecuación  $u + v = w$

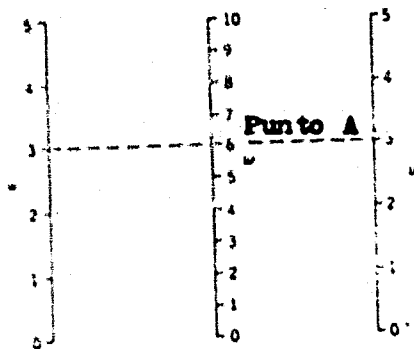


Figura 5. - Nomograma de la ecuación  $u + v = w$

Cualquier punto, como el punto A de la figura 4, es el punto común de tres líneas (punto de concurrencia); en este caso las líneas punteadas indican los valores de  $u = 3$ ,  $v = 3$ ,  $w = 6$  estos valores satisfacen la ecuación dada. En la figura 5, estos tres valores:  $u = 3$ ,  $v = 3$ ,

Ahora observemos, que en la figura 4, tres líneas pasan por el punto "A", y que en la figura 5 estas tres líneas corresponden a las escalas del nomograma, haciendo posible unir los tres valores por medio de una línea recta, la cual corresponde al punto "A" de la figura 4. La relación es que, para cada línea de la gráfica existe un punto correspondiente en el nomograma, para la misma ecuación y así mismo, para un punto en la gráfica corresponde una línea en el nomograma.

## **CAPITULO I.**

### **CONSTRUCCION DE NOMOGRAMAS**

## CAPITULO I.

### CONSTRUCCION DE NOMOGRAMAS.

Para construir un nomograma es necesario tener los siguientes datos:

1. - Conocer la ecuación o ecuaciones que relacionan todas las variables.
2. - Conocer los límites de las variables.
3. - Identificación de la ecuación particular con una ecuación generalizada, a la cual llamamos forma tipo.
4. - Elegir el módulo, o unidad conveniente para emplearse en el trazo de las escalas necesarias.

Los dos primeros incisos, deben ser conocidos de antemano por la persona que quiere construir el nomograma. Los dos últimos incisos se tratarán en este capítulo.

En la discusión posterior  $f(x)$ ,  $\psi(x)$ ,  $F(y)$ ,  $\theta(z)$ ,  $\delta(v)$ ,  $\mu(w)$ , indican las funciones de las variables:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $v$ , y  $w$ , donde  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ ,  $m_v$ , y  $m_w$  se refieren al módulo o escala de  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $v$  y  $w$ .

#### 1.1. - Definición y ejemplo de módulo:

El módulo está definido como la distancia entre dos marcas que representan un cambio de una unidad en la función de la variable.

Ejemplo:  $Y = \frac{M + E}{1.5}$  la cual puede ser identificada

con la forma tipo  $f(x) + F(y) + \theta(z)$ , como después lo veremos, en --  
 donde  $f(x) = 1.5 Y$ ,  $F(y) = M$  y  $\theta(z) = E$ .

Si  $M$  tiene un rango de variación de 10 a 150 y puede ser repre-  
 sentado por 14 cms. el módulo  $m_M$  será  $14/(150 - 10) = 0.1$  cms. --  
 Esta pequeña distancia representa una unidad en la función de  $M$ .

1.2. - Nomogramas del tipo adición:

1.2.a. - Tipo  $f(x) + F(y) + \theta(z) + \mu(w)$

Para la adición de variables, como la ecuación anterior,

permite que:  $\alpha = \theta(z) + \mu(w) \dots \dots \dots (1)$

por lo tanto  $f(x) + F(y) + \alpha \dots \dots \dots (2)$

Un nomograma es construido para la ecuación (1), estando el eje  
 $\alpha$  entre los ejes "z" y "w"; posteriormente, se usa el eje  $\alpha$ , el cual  
 no es necesario que esté graduado y se construye un nomograma similar -  
 al anterior, para la ecuación (2), con el eje "x" colocado entre el eje --  
 "y" y " $\alpha$ ".

El módulo del eje " $\alpha$ ",  $m_\alpha$ , está dado por:

$m_\alpha = m_z m_w / (m_z + m_w) \dots \dots \dots (3)$

mientras que  $m_x = m_y m_\alpha / (m_y + m_\alpha) \dots \dots \dots (4)$

La escala "y", "z", "w" pueden ser localizadas a cualquier al-  
 tura sobre sus respectivos ejes, pero son usualmente centradas, por con-

... la escala "x" de referencia.



sustituyendo los valores de "y", "z" y "w" en las ecuaciones y trazando finalmente la solución por medio de una línea quebrada.

En ocasiones, es más conveniente usar la ecuación en la forma  $\phi(z) = \mu + \psi(w)$ , ya que es permitido que el eje "z" aparezca entre los ejes "y" y "w", como lo muestra la figura 6.

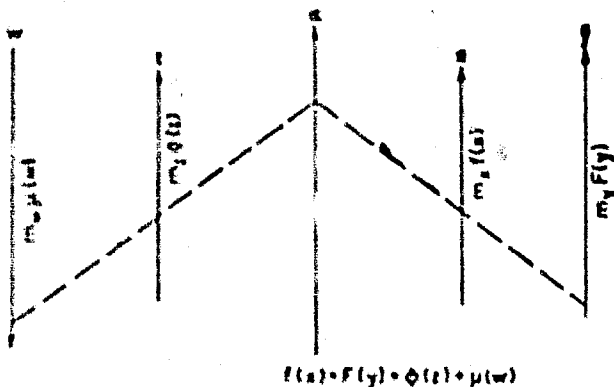


Figura 6.

1.2.b. - Tipo  $1/\phi(x) + 1/F(y) + 1/\theta(z)$

Esta forma es del tipo adición y puede ser graficada con tres ejes, con escalas recíprocas pero, es más conveniente por tres ejes con currentes, como lo muestra la figura 7:

Ejemplo:

Suponer una línea índice que intersecta los tres ejes en los puntos B, C y D y trazamos una línea CE paralela a AB. Construcción de la escala  $AB = m_y F(y)$  y  $AD = m_z \theta(z)$  a lo largo del eje "y" y "z", tene

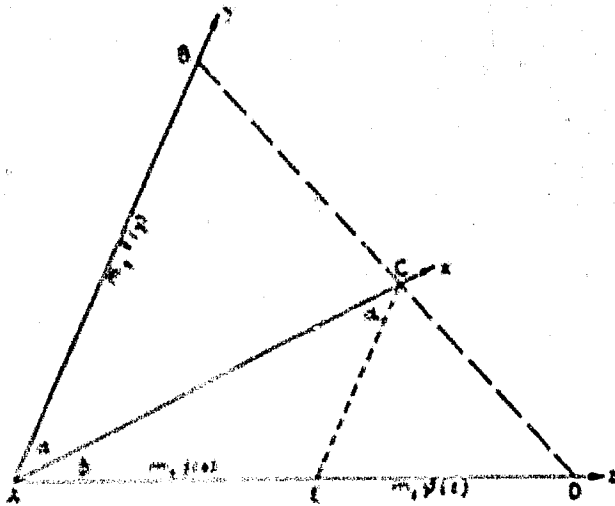


Figura 7.

"x": Trazar la escala auxiliar AE =  $m_2 f(x)$  a lo largo del eje "z" y proyectar la escala "AE" al eje "y" por líneas paralelas a CE. Por triángulos semejantes ECD y ABD.

$$\frac{EC}{AB} = \frac{ED}{AD} = \frac{AD - AE}{AD}$$

Dado que  $EC = (m_1/m_2) AE$ , sustitución de expresiones equivalentes para EC, AD y AE son hechas.

$$\frac{f(x)}{F(y)} = \frac{\theta(z) - f(x)}{\theta(z)}$$

Dado que:

$$\frac{AE}{EC} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta}$$

Cuando:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{m_2}{m_1}$$

Si los módulos escogidos para las escalas "y" y "z" son iguales, los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  son iguales, y :

$$\frac{AC}{AE} = \frac{\text{sen} (180 - 2\alpha)}{\text{sen } \alpha} = \frac{\text{sen } 2\alpha}{\text{sen } \alpha} = \frac{2 \text{sen } \alpha \cos \alpha}{\text{sen } \alpha}$$

de :

$$\frac{m_x f(x)}{m_z f(x)} = \frac{m_x}{m_z} = 2 \cos \alpha$$

Si,  $\alpha$  y  $\beta$  son escogidos como 60 grados,

$$m_x = m_y = m_z$$

#### 1.2. c. - Construcción de escalas:

Use un lápiz puntiagudo 6H para marcar; unir los puntos deseados sobre ejes claramente trazados con un lápiz 4H. Mientras que, marcando fuera de las escalas, el Ingeniero girará los ejes a una posición horizontal y pondrá la escala maestra o regla, cerca de 0.5 mm. de dicho eje.

Use dos puntos, uno sobre el eje y otro justamente abajo con cada quinto o décimo punto, para indicar la necesidad de un trazo más largo.

Esta técnica es especialmente útil para la construcción de escalas no uniformes, dado que el intervalo puede ser 1, 2, 5 ó 10 unidades -- para varias posiciones en la escala.

#### 1.2. d. - Graduación de escalas:

rantizadas; y las divisiones de las escalas pocas veces serán menores -- que 2 mm.

Graduaciones muy cercanas no dejan descubrir las inherentes -- necesidades del trabajo manual y resulta una escala en la que es difícil -- la lectura. Cuando el espacio es limitado, 5 subdivisiones son más favo<sup>o</sup>rables al ojo que 10, y estas pueden ser trazadas más fácilmente y por lo tanto, más exactas.

Cuando graduaciones de 0.1 unidades, estuvieran muy cercanas, graduaciones de 0.2 unidades ó de 0.5 unidades serán más útiles.

El uso de graduaciones de 0.25 unidades es muy confusa, aunque es lo común entre las subdivisiones de pulgadas.

1.2. e. - Longitud de las líneas que marcan las escalas:

En el caso de cartas deseadas con subdivisiones en las escalas -- de  $1/4$  a  $1/2$ , líneas de 3, 4, 5 y 6 mm. de longitud son adecuadas para -- los puntos 0.1, 0.5 y 1 unidades respectivamente.

Cuando sólo dos tamaños de líneas van a ser empleadas, como -- en la graduación a 0.2 unidades, las longitudes de 3 y 6 mm. serán usa-- das, para mayor contraste. Algunos ingenieros prefieren longitudes de 3.5, 5.5 y 7 mm. para los tres tamaños. Cuando las graduaciones son -- muy cercanas (menores de 2 mm), longitudes de 2.5, 4.5 y 6 mm, son -- recomendadas.

### 1.2.f. - Posición de las líneas que marcan las escalas:

En el caso de los ejes extremos, las líneas y la numeración estarán sobre la parte de afuera, aunque bien, este procedimiento no economiza espacio. Para los ejes intermedios, las líneas y la numeración estarán sobre el lado donde haya más espacio.

### 1.2.g. - Leyendas:

Las leyendas serán cortas y estarán situadas en el tope o cabeza de las escalas cuando es posible, o paralelamente a los ejes; a menos que el nomograma esté acompañado por una descripción de la ecuación y literatura referente adjunta a la carta.

### 1.3. - Cartas logarítmicas. -

El 50% de las cartas nomográficas de aplicación industrial son del tipo logarítmico de 3, 4 y 5 variables multiplicadas, que son consideradas ahora.

#### 1.3.a. - Tipo: $t(x) = F(y) \cdot \theta(z)$

Esta operación de multiplicación puede ser resuelta por la forma de adición, tomando logaritmos.

$$\log t(x) = \log F(y) + \log \theta(z)$$

En donde los tres ejes son escalas logarítmicas; a estos tres ejes paralelos corresponden las escalas:

$m_x \log t(x)$ ,  $m_y \log F(y)$ , y  $m_z \log \theta(z)$ , respectivamente.

El espaciamiento de los ejes y los valores de  $m_x$  son determinados exactamente como para el tipo adición.

Para multiplicación, las funciones  $F(y)$  y  $\theta(z)$  graficadas sobre el eje "y" y "z" incrementan en la misma dirección. Para división, --- cuando  $f(x) = F(y) / \theta(z)$  tenemos que:  $\log f(x) = \log F(y) - \log \theta(z)$ ; por lo anterior las funciones  $F(y)$  y  $\theta(z)$  incrementan en direcciones opuestas.

### 1.3.b. - Métodos de construcción de las escalas:

Para la construcción de las escalas logarítmicas de módulo --- 4.1666... 6.25, 8.3333... 10 y 25 cms. una escala estadística de --- Keuffel y Esser es ideal.

Escalas de papel logarítmico de módulo 4.1666 ..... 6.25, --- 8.3333... 10, 12.5, 16.6666... 25, 50 y 100 cms. son utilizables en escalas de tamaño amplio bajo el nombre de "Logarithmic Modulus Chart" que se pueden conseguir en la librería del Virginia Polytechnic Institute -- Blacksburg, del Estado de Virginia, en los E. U. A. El módulo logarítmico puede ser construido de la siguiente forma: usando la escala "C" de -- una regla de cálculo de 25 cm marque la escala logarítmica de un módulo de 25 cms. a lo largo de la línea AB (ver figura 8) y proyecte unas líneas de lápiz de las graduaciones en AB al punto "C", el cual debe estar a 25 - cms. de A.

Las líneas inclinadas cortarán las líneas del módulo vertical en -

--- Tenga una escala logarítmica de ---

un módulo de 12.5 cms., colocando la orilla del papel a lo largo del eje que debe estar graduada y marque los puntos que corten la orilla del papel, obteniéndose así la escala logarítmica deseada. Aunque la gráfica del módulo no se extienda arriba de 25 cms., escalas con módulos mayores de los presentados pueden ser trazados.

Ver ejemplos.

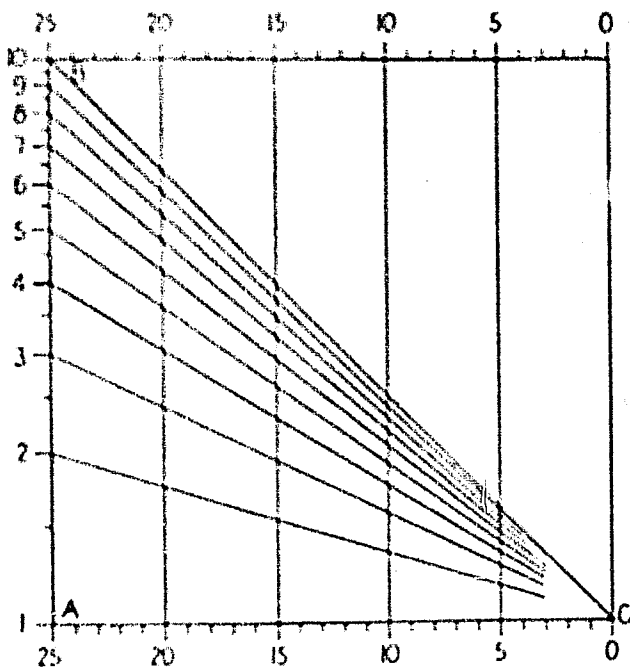


Figura B

1. 1. c. Tipo: Multiplicación de más de dos variables:

$$f(x) \cdot F(y) \cdot g(z) \cdot \mu(w)$$

$$\text{Cuanto } \alpha = g(z) \cdot \mu(w)$$

$$\text{Así } f(x) \cdot F(y) = \alpha$$

y cada una de las ecuaciones de tres variables pueden ser resueltas por el método del inciso 1. 1. a, convirtiéndola en la forma logarítmica:

$$\log \alpha = \log g(z) + \log \mu(w) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{y } \log f(x) = \log F(y) + \log \alpha \dots \dots \dots (2)$$

Una carta nomográfica es preparada para la ecuación (1), en donde el eje  $\alpha$  estará situada entre los ejes "z" y "w". Usando el mismo eje " $\alpha$ " el cual no es necesario graduar, se hace una carta similar para la ecuación (2), donde el eje "x" estará entre el eje "y" y el eje " $\alpha$ ". El módulo de la escala " $\alpha$ ",  $m_\alpha$ , estará dado por:

$$m_\alpha = m_z m_w / (m_z + m_w) \text{ por lo tanto:}$$

$$m_x = m_\alpha m_y / (m_\alpha + m_y)$$

Las escalas "w", "y" y "z" pueden ser localizadas a cualquier altura, sobre sus ejes respectivos, pero son usualmente centradas. Un punto inicial para la escala "x" es encontrado sustituyendo los valores de "y", "z" y "w" en las ecuaciones, y trazando la solución por medio de las líneas quebradas.

El espaciamiento de los ejes depende del módulo; como en la del tipo del inciso 1. 1. a; si se desea, el eje "x" puede ser puesto en el



centro como en la figura 6.

1.3.d. - Intervalos de las escalas logarítmicas:

La tabla siguiente dá sugerencia sobre los intervalos, para la graduación de las escalas logarítmicas, para el ciclo de 1 a 10, para módulos de  $4 \frac{1}{6}$  a 100 cms.

| Módulo<br>(cms) | Rango  | Intervalo |
|-----------------|--------|-----------|
| 4 1/6           | 1 - 2  | 0.2       |
|                 | 2 - 6  | 0.5       |
|                 | 6 - 10 | 1         |
| 6 1/4           | 1 - 3  | 0.2       |
|                 | 3 - 10 | 0.5       |
| 8 1/3           | 1 - 2  | 0.1       |
|                 | 2 - 4  | 0.2       |
|                 | 4 - 10 | 0.5       |
| 12 1/2          | 1 - 3  | 0.1       |
|                 | 3 - 6  | 0.2       |
|                 | 6 - 10 | 0.5       |
| 25              | 1 - 2  | 0.05      |
|                 | 2 - 6  | 0.1       |
|                 | 6 - 10 | 0.2       |
| 50              | 1 - 2  | 0.02      |
|                 | 2 - 6  | 0.05      |
|                 | 6 - 10 | 0.1       |
| 100             | 1 - 2  | 0.01      |
|                 | 2 - 4  | 0.02      |
|                 | 4 - 10 | 0.05      |

### 1.3.e. - Numeración de las escalas:

Para un ciclo de 1 a 10, escalas logarítmicas de un módulo de 12 1/2 cms. o menores serán numeradas con el 1, 2, 4, 6, 8 y 10; para módulos de 25 cms. con el 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 10 (notar que falta el 9) y para módulos de 50 y 100 cms. se usa: 1, 0, 1, 2, 1, 4, 1, 6, 1, 8, 2, 0, 2, 5, 3, 0, 3, 5, 4, 0, 5, 0, 6, 0, 7, 0, 8, 0, 9, 0 y 10, 0.

Cuando varios ciclos son requeridos y la numeración es alta, como de 100 a 1,000,000, los puntos 100, 1,000, 10,000, 100,000, y 1,000,000 serán escritos cada uno como potencias de 10 ( $10^2$ ,  $10^3$ , etc) o simplemente 2, 4, 6, 8, los cuales serán suficientes para los puntos intermedios.

Este procedimiento evita confusiones en la carta, e incrementa el espacio libre, lo cual es muy conveniente en un nomograma.

### 1.3.f. - Aproximación de graduaciones

Varias escalas no uniformes y otras variedades de logarítmicas son empleadas por el nomografista. Esto depende de la naturaleza de las funciones que han de ser graficadas y no pueden trazarse directamente con ayuda mecánica en teoría. La localización de cada punto será calculado en la práctica, es a menudo suficiente localizar cada 5 puntos por cálculo, y aproximar la localización de los puntos intermedios. Esto es hecho por acoplamiento de los quintos puntos con ciertas partes de escalas logarítmicas o de módulo. La figura 9 da una reproducción de -

una escala basada en  $x / (100 - x)$  cuando, en una escala completa, el --  
 módulo fué 150. Valores de  $150 x / (100 - x)$  son calculados.

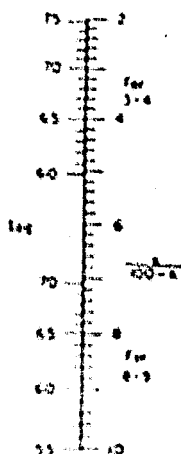


Figura 9.

#### 1.4. - Combinación de cartas:

Cartas nomográficas son frecuentemente necesarias para cál-  
 culos manuales, que combinan las operaciones de multiplicación o divi-  
 sión con operaciones de adición o sustracción, como por ejemplo:

$$f(x) = \frac{F(y)}{g(z)} + \mu(w)$$

##### 1.4. a. - Uso de líneas paralelas de referencia:

Ejes paralelos son unidos por una diagonal de longitud AC, --  
 uniendo el punto cero de la función graficada. La escala  $AB = m_x f(x)$  y  
 $AE = m_y F(y)$  son trazadas en lados opuestos de uno de los ejes parale-  
 los y la escala  $CD = m_x \mu(w)$  es construida sobre la otra.

La escala  $Ah = m_z g(z)$  es trazada a lo largo del eje diagonal y -

Dos líneas índices son necesarias para efectuar una solución: -  
 una, uniendo los valores de "y" y "z" y la otra uniendo los valores de -  
 "x" y "w".

Todo esto lo muestra la figura 10:

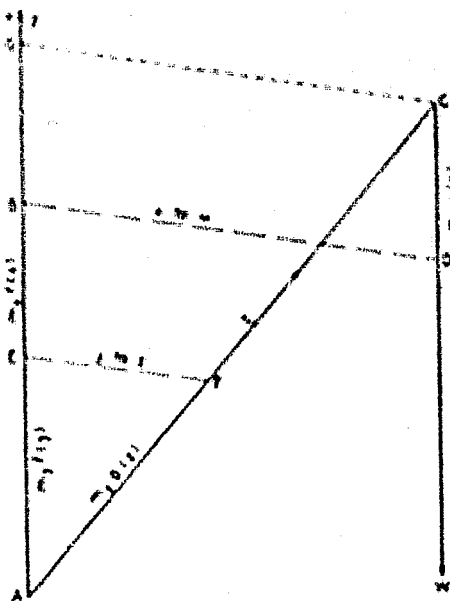


Figura 10

1.4.b. - Combinación de tipos de cartas de adición y logarítmicas:

Combinación de operaciones de multiplicación y suma, pueden ser hechas por un nomograma que emplee escalas naturales y logarítmicas. La forma de la ecuación es la siguiente:

$$f(x) = \frac{F(y)}{G(z)} + \mu(w)$$

Si  $\alpha = \frac{F(y)}{G(z)} \dots \dots \dots (1)$

Por lo tanto:  $f(x) = \alpha + \mu(w) \dots \dots \dots (2)$

y aplicando los métodos anteriores, encontramos que para la primera --  
 ecuación hay que usar una de tipo logarítmico y para la segunda una del --  
 tipo de adición. Un ejemplo de estas cartas está dada por la figura 11:

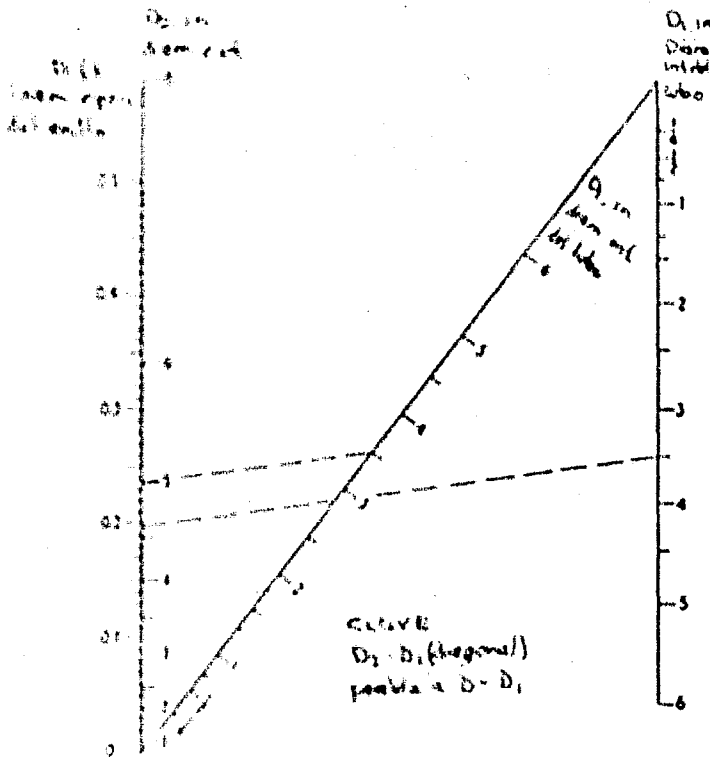


Figura 11.

1.4.6.- Nomogramas de líneas concurrentes:

Una forma especial de nomograma es conocida como "nomogramas de líneas concurrentes", que es de gran importancia en la presentación de una gran variedad de datos de ingeniería.

Esta es del tipo:

$$G(x) = a + b F(y) \quad \text{en donde:}$$

F(y) y  $\theta(z)$  son graficadas en direcciones opuestas sobre ejes paralelos, los módulos  $m_y$  y  $m_z$  son calculados en la misma forma que siempre los hemos calculado. la ecuación de las escalas son  $m_y F(y)$  y  $m_z \theta(z)$ . La línea de referencia une pares de valores de "y" y "z" dando un punto común de intersección, el cual está entre los dos ejes.

Cuando la escala "y" y "z" son trazadas en la misma dirección, el punto común de intersección da fuera de los ejes paralelos.

Un ejemplo de estos nomogramas, viene dado por la figura 12.

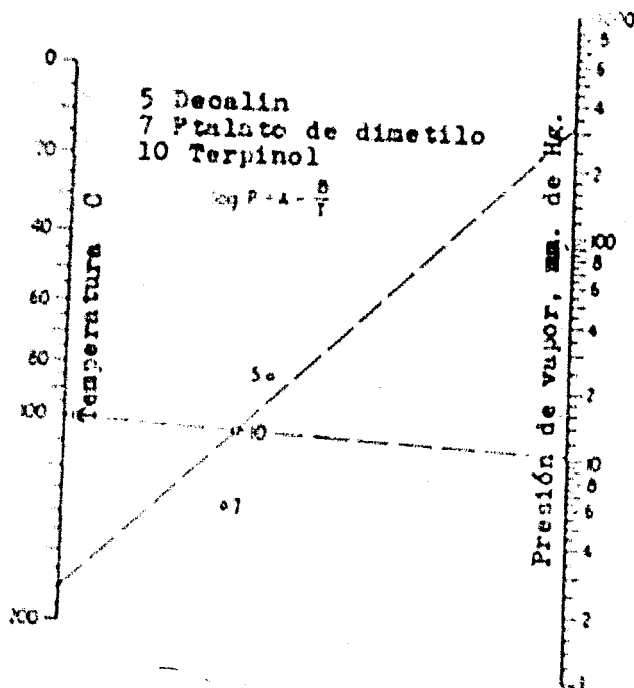


Figura 12

## **CAPITULO II.**

### **NOMOGRAMAS USADOS EN DESTILACION**

**2.1. - NOMOGRAMAS USADOS PARA ENCONTRAR LO RELACIONADO  
AL EQUILIBRIO ENTRE FASES.**



## 2.1. a. EQUILIBRIO VAPORES LIQUIDO Y CONVERSIONES. -

BASE: Teórica

$$Y_1 = \frac{\alpha X_1}{1 + (\alpha - 1) X_1}$$

### NOMENCLATURA:

$X_1$  : Fracción mol del componente más volátil en el líquido

$Y_1$  : Fracción mol del componente más volátil en el gas

$\alpha$  : Volatilidad relativa

$M$  : Peso molecular

$d$  : Densidad

### OBSERVACIONES:

El nomograma puede ser usado para varias conversiones, si la siguiente nomenclatura es usada:

| Conversion:     |        | Nomenclatura: |                      |
|-----------------|--------|---------------|----------------------|
|                 | $Y_1$  | $X_1$         | $\alpha$             |
| % peso : % mol  | % peso | % mol         | $M_1/M_2$            |
| % peso + % vol. | % peso | % vol.        | $d_1/d_2$            |
| % vol. : % mol  | % vol. | % mol         | $(M_1/M_2)(d_2/d_1)$ |

### MODO DE USARSE:

Unir simplemente los valores conocidos de dos variables con una línea recta, y leer el tercer valor, que es la respuesta.

### EJEMPLO:

Para una mezcla de benceno tolueno, conteniendo 20% mo--

las de benzona, estimar la composición del vapor en el equilibrio, si:

$$P = 1.21$$

Siguiendo las indicaciones anteriores encontramos que:

$$Y_1 = 11.2 \% \text{ molar}$$

**EJEMPLO:** Una solución acuosa de alcohol etílico contiene 79% de alcohol en volumen, estimar el % molar de alcohol en la mezcla

$$Y_1 = 0.79$$

$$P = (46/18) (1/0.79) = 1.21$$

Usando el 0.79 con el 1.21 por una línea recta encontramos -

que  $X_1 = 51.8 \% \text{ molar de alcohol}$ .

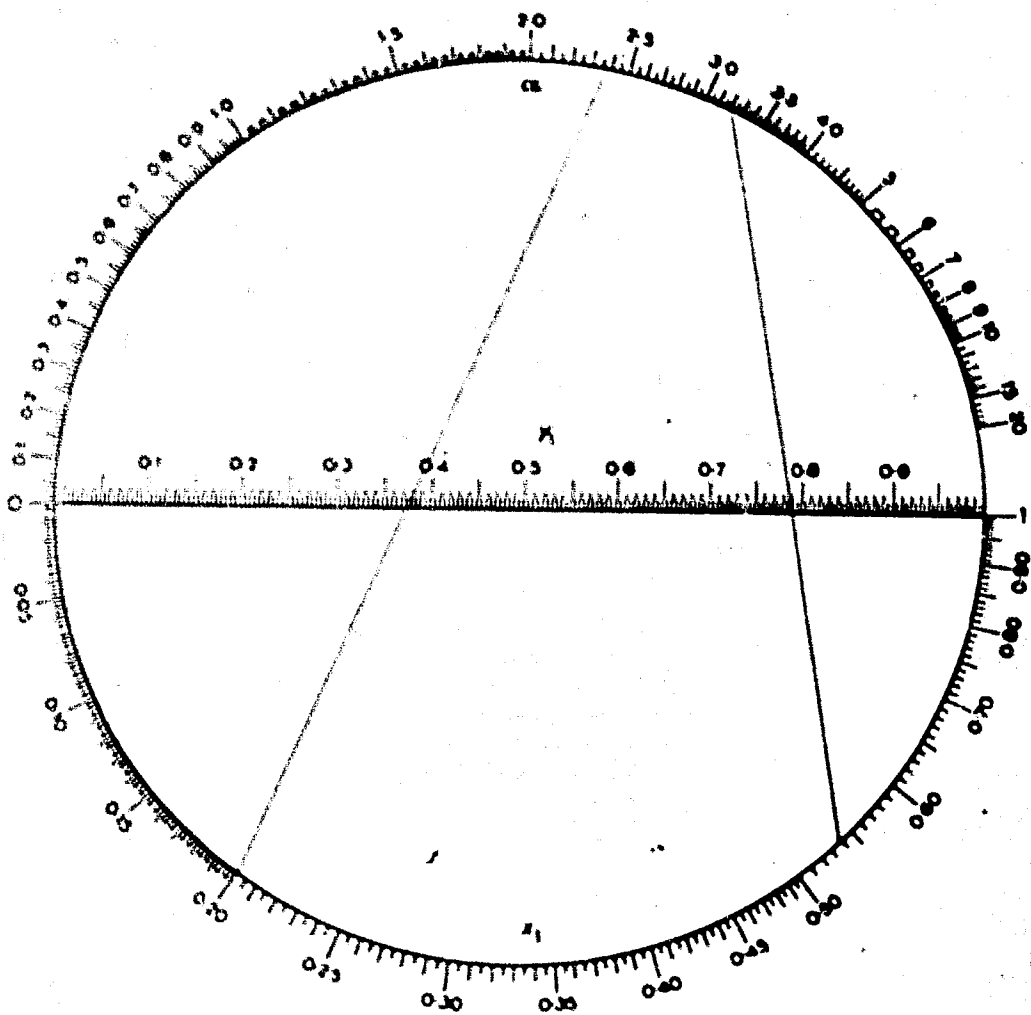


FIGURA 13

## 2.1.5. VOLATILIDAD RELATIVA PARA MEZCLAS IDEALES. -

BASE: Semi-empírica. Ecu. de Melpolder y Headington

$$\log r = \Delta t \left( \frac{1.19}{t} + 0.00194 \right)$$

### NOMENCLATURA:

- \* = volatilidad relativa
- t = punto de ebullición de la mezcla a 1 atm. en grados C.
- $\Delta t$  = diferencia de puntos de ebullición a 1 atm.

**OBSERVACIONES:** Este nomograma sólo se usa para mezclas ideales, -  
y para solamente 1 atmósfera de presión.

La exactitud de este nomograma es la misma que la exactitud -  
dada por la ecuación anterior.

**MODO DE USARSE:** Este nomograma es muy simple para su manejo, só

lo hay que unir por medio de una línea recta los valores conoci-  
dos y leer la respuesta en la línea correspondiente.

**EJEMPLO:** Consideremos una mezcla benceno - tolueno, cuya tempera-  
tura de ebullición es de 100°C, la temperatura de ebullición del  
benceno es de 80.1°C y la del tolueno 110.6°C; todo esto es a  
una atmósfera

$$t = 100^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = 110.6 - 80.1 = 30.5^{\circ}\text{C}.$$

Utilendo los valores de t y  $\Delta t$  correspondientes, que son los -  
anteriormente escritos obtenemos una volatilidad relativa de:

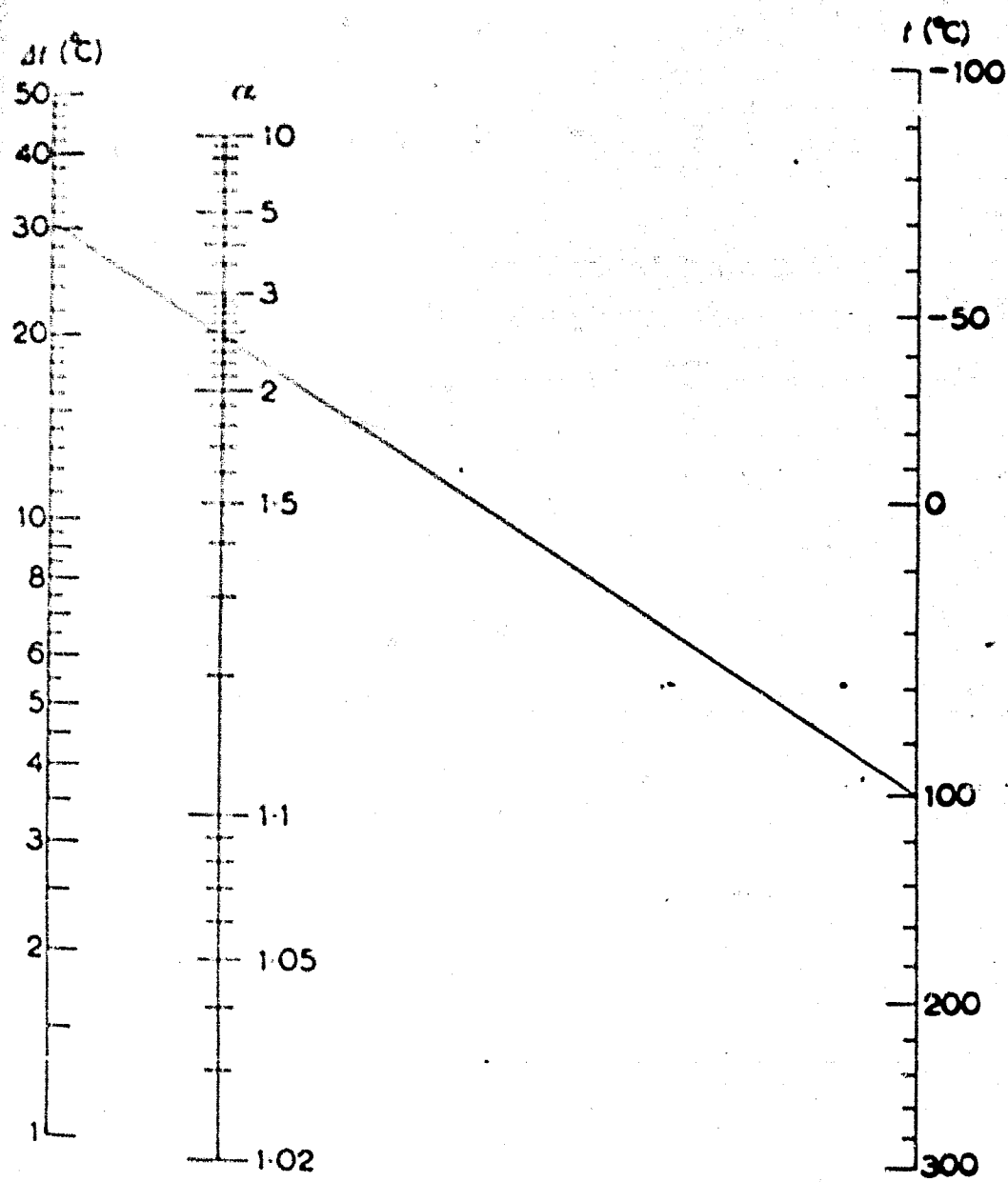


FIGURA 14

# FORMULA PARA MEZCLAS BINARIAS

BASE:  $\log \frac{a}{1-a} = \frac{t - t_m}{\Delta t} \left( \log P - \frac{t_m}{178 \log P} \right)$

## DEFINICIONES

- $a$  = volatilidad relativa
- $t$  = punto de ebullición promedio de la mezcla
- $\Delta t$  = diferencia de los puntos de ebullición de los dos componentes
- $P$  = presión absoluta en mm Hg

## OBSERVACIONES

1. Si la presión es de una atmósfera, usar el nomograma anterior.
2. Sólo se aplica a volatilidades menores de 10

## MODO DE USARSE:

1. El punto inicial es en la temperatura media de ebullición.
2. Se une el punto inicial con la presión total, continuándose la línea hasta cruzar la línea de referencia.
3. El punto en la línea de referencia se une con la diferencia entre los puntos de ebullición, continuando la línea hasta llegar a la escala de la volatilidad relativa.

EJEMPLO: Estimar la volatilidad relativa para una mezcla binaria de propano y n-butano a 114.7 lb/in<sup>2</sup> absolutas.

A esta presión se conocen los siguientes datos:

temp. de ebullición del i-butano      132°F

temp. de ebullición del n-butano      155°F

temp. de ebullición de la mezcla      146°F

Usando la escala de  $t_m$  ( 146°F ) con la escala de la presión -  
( 114.7 lb/in<sup>2</sup> ), continuamos hasta la línea de referencia. --

Unimos este punto con el del  $\Delta t$  ( 23°F ) y llegamos hasta el va-  
lor de  $\mu = 1.36$

La  $\mu$  calculada por presiones de vapor es de 1.355; luego -  
el porcentaje de error es casi inapreciable.

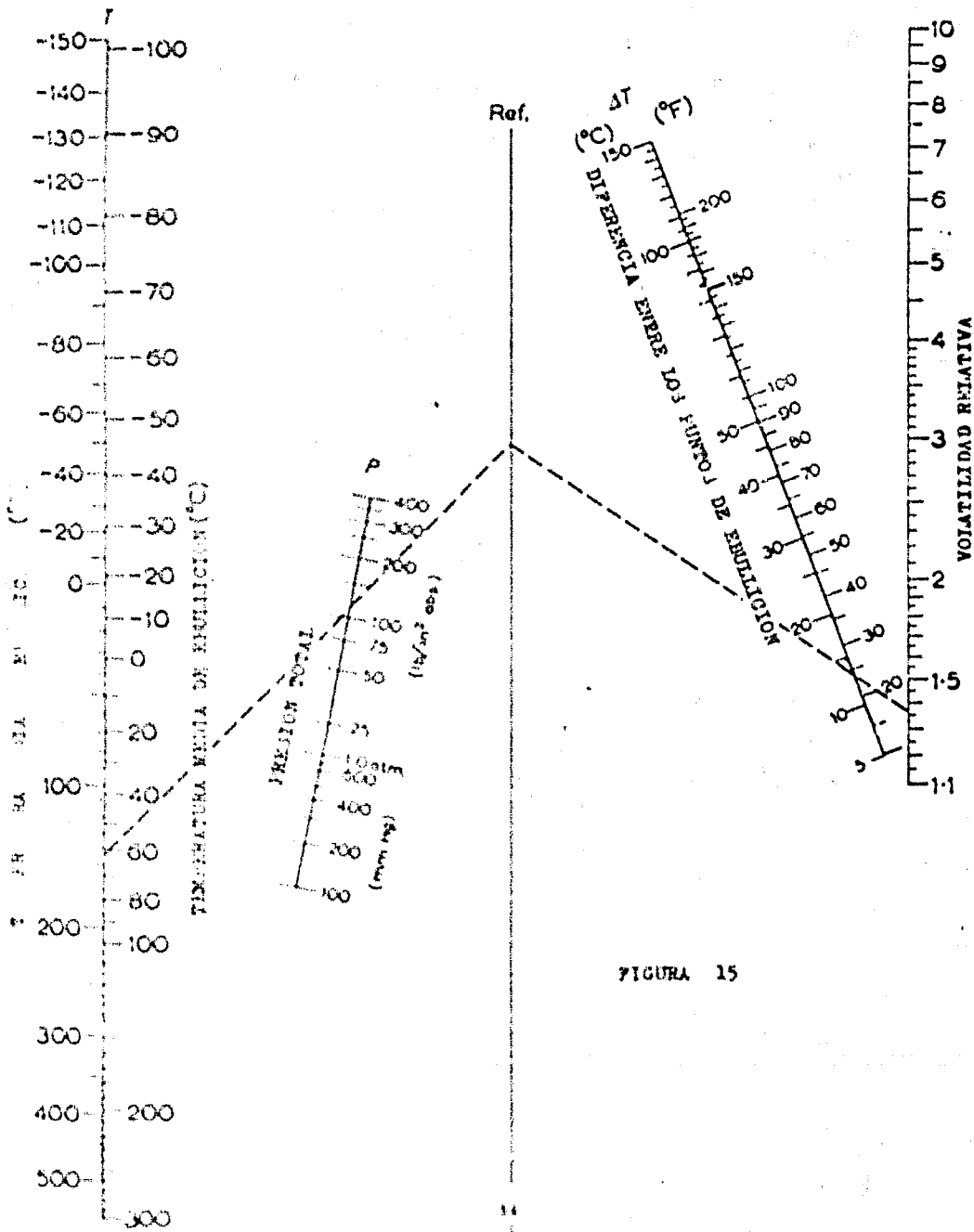


FIGURA 15



## 2.1.4. - CONSTANTE DE EQUILIBRIO. -

BASE: empírica:

$$\log K_p = a \log K_{10} + b$$

### NOMENCLATURA:

- $K_p$  = constante de equilibrio a la presión deseada.
- $K_{10}$  = constante de equilibrio a 10 psia.
- $a$  y  $b$  = constantes y son funciones de  $P$  y  $P_g$
- $P$  = presión de operación en psia.
- $P_g$  = presión de convergencia en psia.

### OBSERVACIONES:

1. - Tiene una aproximación promedio del 6%
2. - Para una presión de convergencia de alrededor de 2000 ll bras. la ecuación es válida para valores muy altos de  $K_{10}$

### MODO DE USARSE:

1. - Encontrar el punto normal de ebullición de la sustancia re querida.
2. - Con el punto anterior y la temperatura de operación traza mos una línea hasta cruzar la escala  $K_{10}$
3. - Buscamos el punto de intersección de la presión de opera- ción y la presión de convergencia, dentro de la rejilla.
4. - Con este punto y con el obtenido en la escala  $K_{10}$  traza mos una línea recta, cruzando así la escala  $K_p$

**EJEMPLO:**

Encuentra la  $K$  del pentano a  $200^{\circ}\text{F}$  y 150 psia cuando la presión de convergencia es de 1500 lb.

Haciendo los pasos anteriores encontramos que  $K_{\text{H}} = 0.57$

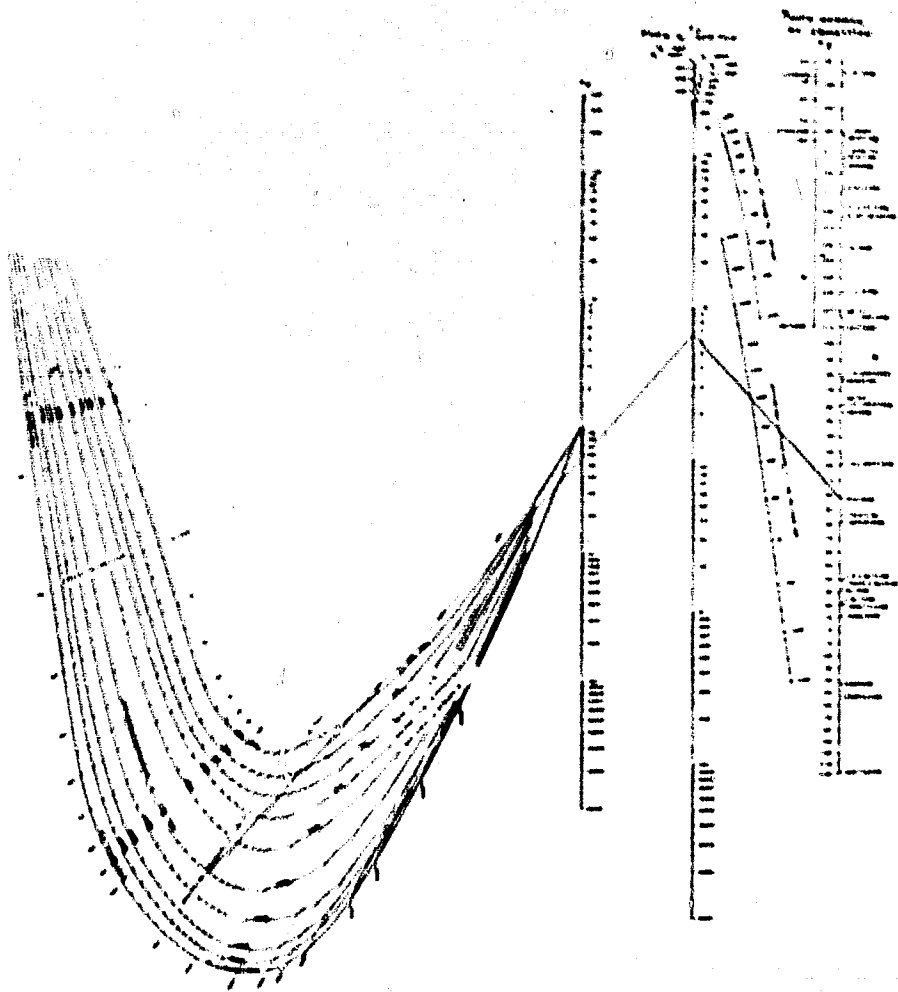


FIGURA 16

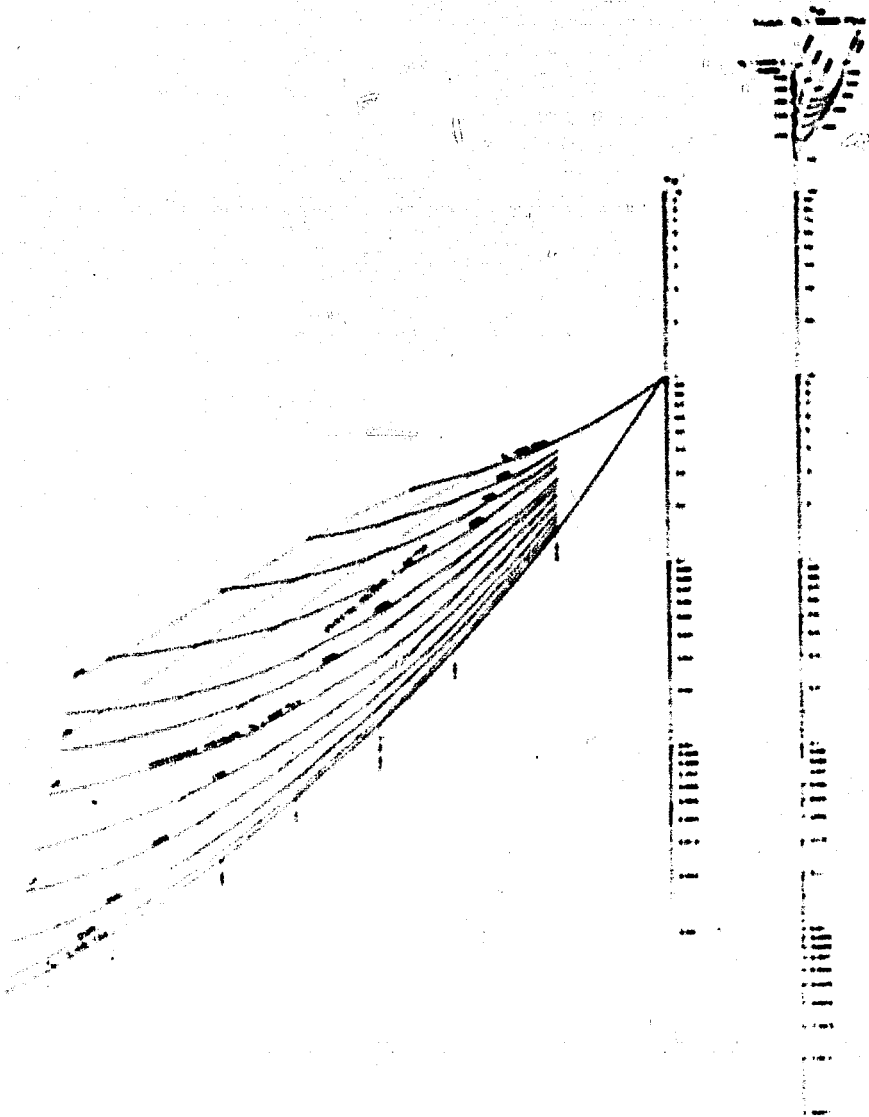


FIGURA 17

## 2.1.1. DESTILACION A PRESION REDUCIDA.

### CALCULO DE LAS TEMPERATURAS DE EBULLICION O DE PRESIONES DE VAPOUR PARA BAJAS PRESIONES.

BASE: teórica:

$$\log P + A = \frac{B}{210 + t}$$

#### NOMENCLATURA

P = presión de vapor ó presión de trabajo, en mm Hg

A = etc.

B = etc.

t = temperatura °C

△, +, ⊕, ⊖. signos que se le deben de poner a los puntos de intersección para saber con qué escala se hicieron.

#### OBSERVACIONES

Existen 4 escalas de temperatura, de manera que para todas -- las sustancias cuya temperatura de ebullición ordinaria esté -- comprendida entre 60 y 450 °C, se puede hallar las temperaturas de ebullición hasta las presiones de unos pocos mm. de Hg. Para cada sustancia hay que inscribir el punto correspondiente, a base de dos pares de valores conocidos de presión y temperatura.

Para escoger la escala de temperaturas apropiadas, en caso -- de que pudiera haber duda entre dos escalas, hay que tener en cuenta que la escala más correcta es la que da un punto de in-

tersección más central, en el sentido vertical.

#### MODO DE USARSE:

1. - Con dos pares de valores se traza el punto de insidencia.
2. - Con la presión requerida y el punto de insidencia se traza una línea, hasta cruzar con las escalas de temperatura, leyendose la respuesta en la misma escala que se usó para obtener el punto de insidencia.

#### EJEMPLO 1:

Obtener la temperatura de ebullición del ácido acrílico a la presión de 5 mm de Hg y para 100 mm Hg: sabiendo que:

a 760 mm Hg . . . . . 141°C

a 400 mm Hg . . . . . 122°C

Respuesta 1 : 11°C.

Respuesta 2 : 87°C.

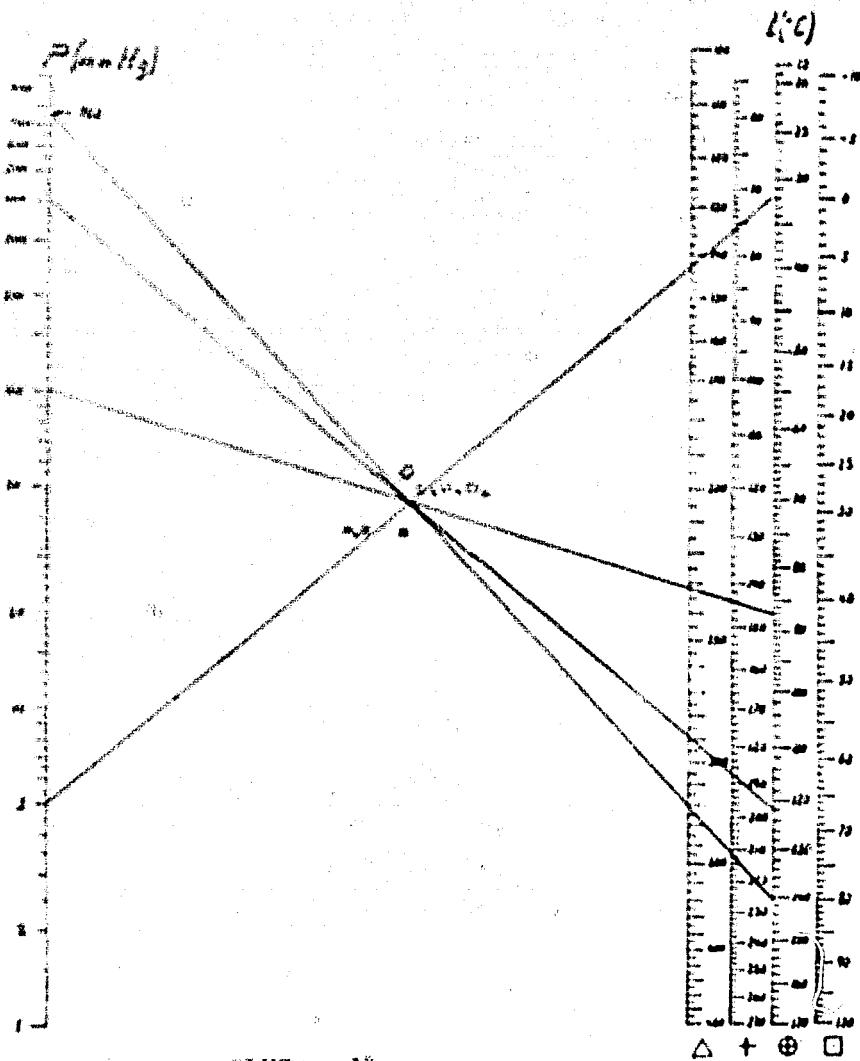


FIGURA 18

## 2.1.1. COEFICIENTES DE ACTIVIDAD PARA OBTENER LAS COM- POSICIONES VAPOR LIQUIDO EN SISTEMAS NO IDEALES. -

BASE: Para el nomograma 1:

$$\log \left( \frac{1}{X_1^2} \right) + \log \log P_2' + \log C + \log \log P_1'$$

Para el nomograma 2:

$$\log T + \log \log v_1 + \log A - \log (CX + 1)^2$$

$$\log T + \log \log v_2 + \log B - \left( \log \frac{1}{CX} + 1 \right)^2$$

### NOMENCLATURA:

- A, B • Constantes de la ecuación de Van Laar, características de un sistema, independientes de la temperatura y de la composición.
- 1, 2 • Denotan los componentes 1 y 2.
- C • Constante = A/B
- $P_1'$ ,  $P_2'$  • Presión de vapor de los componentes puros 1 y 2 en mm. de  $H_g$  en el punto de ebullición azeotrópico de la mezcla a la presión de 1 atm.
- T • Temperatura en grados K
- $x_1$ ,  $x_2$  • Fracción mol del componente 1 y 2 en la solución a la temperatura de ebullición de la mezcla azeotrópica.
- X •  $x_1/x_2$



$\zeta_1, \zeta_2$  = Coeficiente de actividad de los componentes en la solución.

$$x^* = x'_1/x_2$$

#### OBSERVACIONES:

Los nomogramas 1 y 2 pueden ser usados para resolver la ecuación de Van Laar, en la estimación de los datos de equilibrio vapor-líquido, a partir de los datos azeotrópicos, los cuales -- han sido colectados extensivamente por Horsley, L.H. - Analytical Chemistry, 19, 508, (1947).

#### MODO DE USARSE:

- 1.- En el nomograma 1, alinea  $x'_1$  sobre la escala  $x^*$  con el punto  $P'_1$  de la escala  $P'$ , para intersectar un punto -- sobre  $R_1$ , la primera línea de referencia. Alineando es te punto de intersección con  $P'_2$  sobre la escala  $P'$  se -- obtiene el valor de C.
- 2.- Alineando C con  $x'_1$  sobre la escala  $x'_1$  se lee  $CX^*$  y --  $1/CX^*$ .
- 3.- En el nomograma 2, alineando  $t'$  al punto azeotrópico de ebullición en grados C sobre la escala  $t$  con  $\theta_1$ , se -- lee de una escala estacionaria de  $\theta_1$  del valor de  $P'_1$ , en el nomograma 1 para intersectar un punto sobre  $R_2$ . -- Entonces, alineando este punto con  $CX^*$  se obtiene el va--

lor de la constante A. Alineando  $t'$  sobre la escala  $t$ , --  
 con  $\theta_2$  sobre la escala  $\theta$  para intersectar un punto --  
 sobre  $R_2$ , entonces se alinea este punto con el valor de --  
 $1/CX$  sobre la escala  $CN$  para leer el valor de B en su  
 propia escala.

4. En el nomograma 1 alinear C con  $x_1$  sobre la escala  $x$   
 para leer  $CX$  y  $1/CX$  en la primera de sus escalas.
5. En el nomograma 2 alinear  $CX$  con la constante A para in  
 terseccionar un punto sobre  $R_2$ ; alinear este punto con  $t$  en  
 la escala de temperatura para obtener  $\theta_1$ ; alinear --  
 $1/CX$  con B, para intersectar un punto sobre  $R_2$ , alinear l  
 lo con  $\theta$  para conseguir el valor de  $\theta_2$  al lado de su --  
 escala.

#### EJEMPLO 1:

La composición azeotrópica de la mezcla etanol benceno es --  
 44, 8% molar de etanol, con un punto de ebullición de  $68, 24^\circ C$   
 a 760 mm de Hg. A  $68, 24^\circ C$  la presión de vapor del benceno  
 puro es de 517 mm Hg y la del etanol es de 506 mm Hg. Eva-  
 luar el coeficiente de actividad para una solución conteniendo -  
 10% molar de etanol.

Evaluación de las ctes. A y B.

$$P_1^0 = 517 \text{ mm Hg}$$

$$P_2^0 = 506 \text{ mm Hg}$$

En el nomograma 1, conectar el punto 0,552 sobre la escala --  
 $x_1$  con 517 en la escala  $P'$ , para intersectar la escala  $R_1$ .  
 Conectamos este punto con 100 sobre la escala  $P'$  y extendemos  
 la línea para cortar la escala C a un valor de 0,66. Unimos --  
 el 0,66 de la escala C con 0,552 de la escala  $x_1$  para obtener --  
 0,8 de la escala  $CX'$  y 0,182 de  $1/CX'$  sobre la escala  $1/CX$ .

En el nomograma 2, una 68,24 de la escala t con 1,47 de la es-  
 cala  $\gamma$  para obtener un punto de intersección con la escala --  
 $R_2$ . Conectar este punto, de la escala  $R_2$  con 0,8 de la escala  
 $CX$  para obtener  $A = 187$  de la escala A o B. Igualmente, --  
 conecte 68,24 de la escala t con 1,50 de la escala  $CX$  para obte-  
 ner un punto de intersección en  $R_2$ , el cual se une con el valor  
 de  $1/CX = 1,2$  en la escala  $CX$  para obtener  $B = 2,82$

#### Evaluación de $\alpha$ y $\gamma$ a 2

En el nomograma 1, una 0,66 de la escala C con 0,89 de la es-  
 cala  $x_1$  para leer 5,8 y 0,182 en la escala  $CX$  y  $1/CX$  respecti-  
 vamente. En el nomograma 2 conecte 5,8 de la escala  $CX$  --  
 con 187 de la escala A, para intersectar un punto sobre  $R_2$ . --  
 uniendo este punto con el punto de 72,4 en la escala t, cruzan-  
 do así la escala  $\alpha$  a un punto de 1,927, el cual es el coefi-  
 ciente de actividad del benceno. Así mismo, en el nomograma-  
 ma 2 conecte 0,18 de la escala  $CX$  con 282 de la escala B, pa-  
 ra dar un punto de intersección en la escala  $R_2$ . Unir este --  
 punto con 72,4 de la escala t, cruzando la línea de la escala --

dando como respuesta que la  $\gamma$  del etanol = 3.14

### EJEMPLO 2:

Estimar el coeficiente de actividad para una solución de acetona y cloroformo con una fracción mol de la primera igual a 79.6% a una temperatura de 59.4°C.

La mezcla azeotrópica tiene una temperatura de ebullición de 64.5°C a 14.5% molar de acetona. Los datos de presión de vapor son:  $P_1^s = 1040$  mm Hg  $P_2^s = 785$  mm Hg.

Evaluación de las constantes A y B: En el nomograma 1, unir el punto 0.145 de la escala  $x_1^s$  con 1040 de la escala  $P^s$ , para intersectar así la escala  $R_1$ , con este punto y con  $P_2^s = 785$ , de la escala  $P^s$  los unimos y extendemos la línea hasta cortar la escala C, dándonos un valor de 3.7. Unimos este punto con 0.145 de la escala  $x$ , para obtener 2 y 0.5 en la escala CX y  $1/CX$  respectivamente.

En el nomograma 2 conectar 64.5 de la escala  $t$  con  $(1/\gamma_1^s) = 1/0.731 = 1.368$  en la escala  $\gamma$  para obtener un punto de intersección con la escala  $R_2$ . Unir este punto con 2 de la escala CX para obtener el valor de A, dándonos 410 en la escala A. Así mismo, conectar 64.5 sobre la escala  $t$  con  $(1/\gamma_2^s) = 1/0.785 = 1.274$  en la escala  $\gamma$  para obtener un punto de intersección en la escala  $R_2$ . Unir este punto con 0.5 de la escala CX para obtener el valor de 10.2 para B sobre su misma escala.

## Evaluación de $\gamma_1$ y $\gamma_2$

En el nomograma 1 unir el punto de 1.7 de la escala C con 0.105 de la escala x, para leer 14 y 0.08 de la escala CX y 11CX respectivamente. En el nomograma 2, una el 14 de la escala CX con el punto de la escala A : 410 para obtener un punto en B<sub>2</sub>. Unir este punto con 59.2 de la escala t cruzando la escala  $\gamma$  en el punto 1.012. El coeficiente de actividad de la acetona es por lo tanto  $1/1.012 = 0.986$ .

De la misma forma que lo anterior obtenemos que el coeficiente de actividad del cloroformo es igual a  $1/1.067 = 0.937$ .  
NOTA: este segundo ejemplo es el que está graficado en los nomogramas.

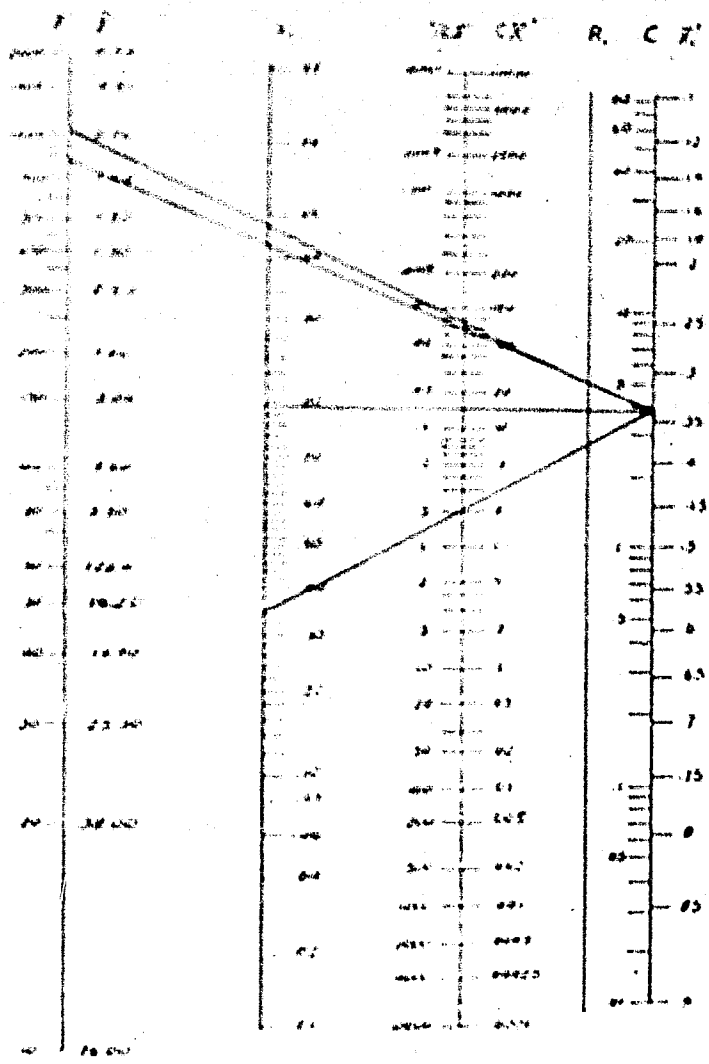


FIGURA 19

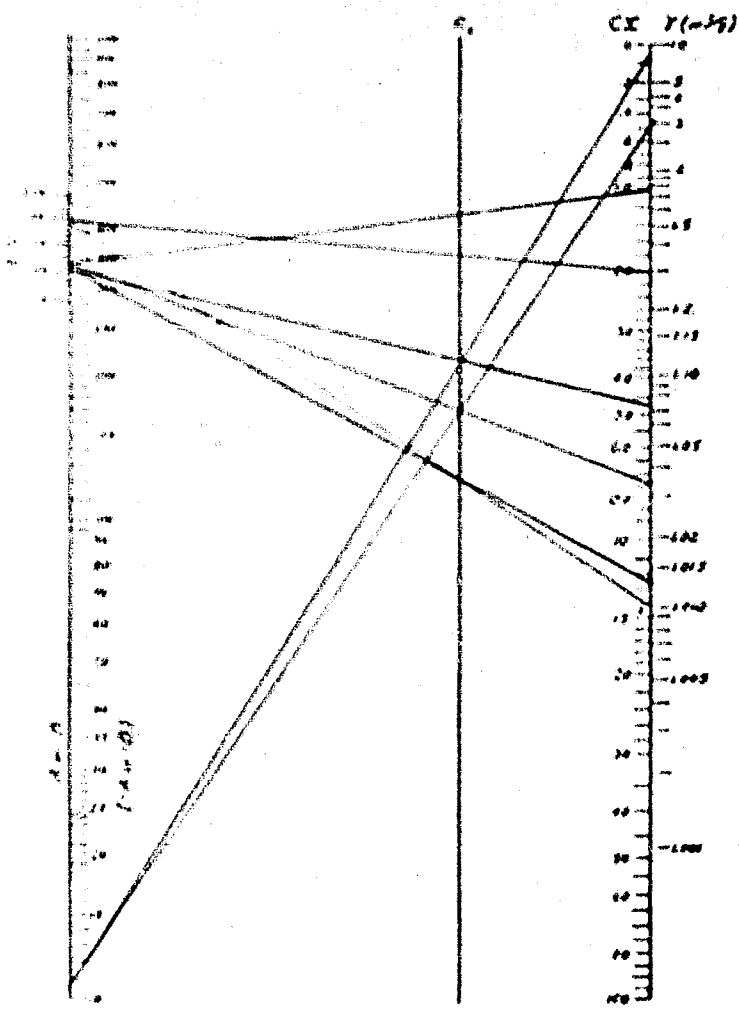


FIGURA 20

## 2.1.6. EQUILIBRIO VAPOR LIQUIDO EN SISTEMAS TERNARIOS. -

BASE

$$\frac{x_1}{x_2} = \alpha \frac{y_1}{y_2}$$

NOMENCLATURA:

$x_1 = x_2$  = fracción mol del componente 1, 2 en la fase líquida.

$y_1 = y_2$  = fracción mol del componente 1, 2 en la fase vapor.

$\alpha$  = volatilidad relativa.

OBSERVACIONES

Se usa para cualquier mezcla o sistema ternario.

MODO DE USARSE:

- 1.- Sitúe el punto L representativo del líquido dado.
- 2.- Encontrar  $\alpha_{1,2}$
- 3.- Una el vértice 1 con el valor apropiado de  $\alpha_{1,2}$  obteniéndose la línea r
- 4.- Del vértice 3 proyecte L sobre la línea r, obteniéndose la línea l, la cual es  $x_1/x_2$  etc. y también obtenemos el punto M.
- 5.- Del punto C (ver nomograma) proyecte M sobre el lado 1-2 del triángulo dando la línea P y obteniéndose el punto N.
- 6.- Conecte el punto N con el vértice 3 obteniéndose la línea V la cual es  $y_1/y_2$  etc.  $\alpha_{1,2} = x_1/x_2$



7. - Repita las operaciones de 2. - a 6. - para el otro par de componentes.
8. - El punto  $V'$  cuando  $V'$  intersecta a  $V$ , el punto que se obtiene es el representativo de el vapor en equilibrio con su líquido correspondiente.

Cuando  $V$  es dado, y  $L$  es lo que se quiere encontrar, se siguen los mismos pasos pero en forma inversa.

### EJEMPLO:

Para una mezcla líquida con la siguiente composición, encontrar la composición del vapor en equilibrio:

$$x_1 = 0.27$$

$$x_2 = 0.58$$

$$x_3 = 0.15$$

$$\alpha_{1,2} = 1.5$$

$$\alpha_{2,3} = 0.05$$

$$\alpha_{1,3} = 0.5$$

Haciendo todos los pasos indicados anteriormente encontramos:

$$y_1 = 0.11$$

$$y_2 = 0.16$$

$$y_3 = 0.73$$

---


$$1.00$$

Por lo tanto está correcta la respuesta.

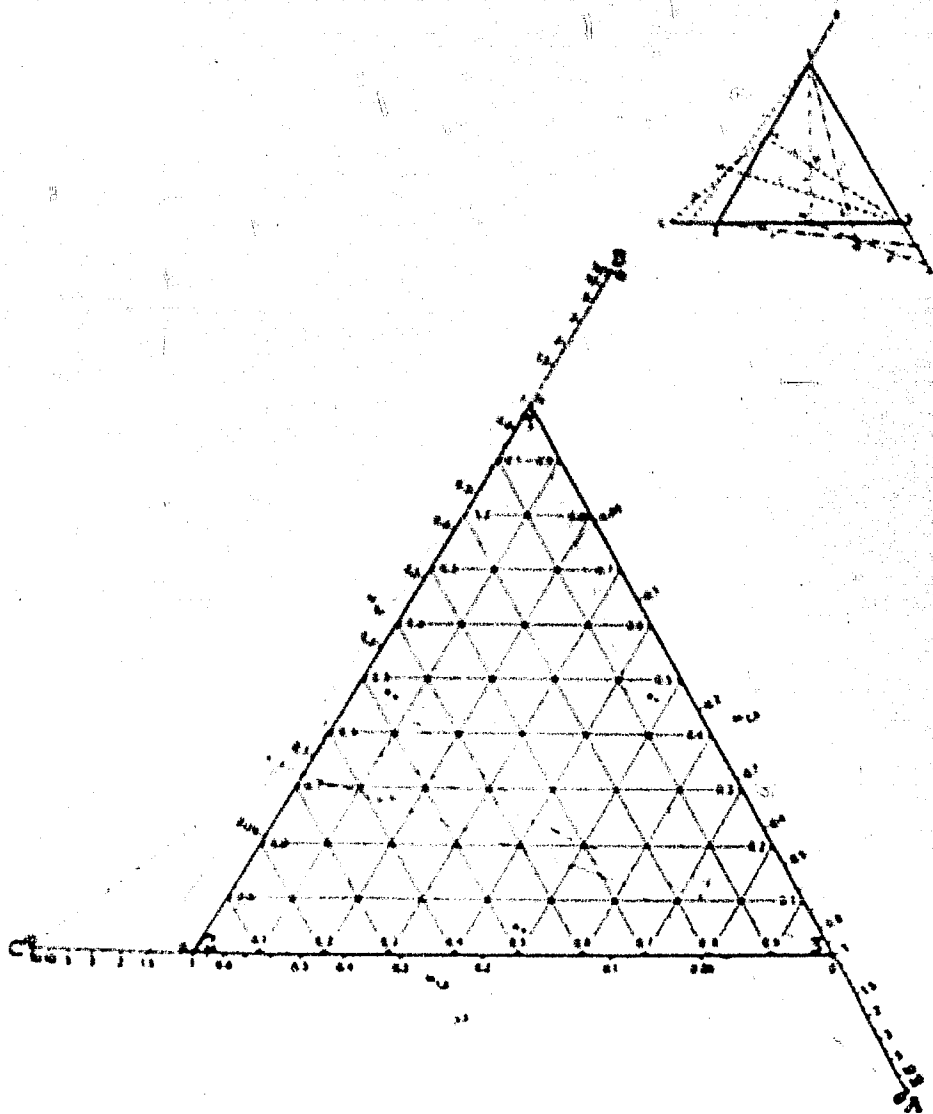


Figure 21

## 2.2. DESTILACION INSTANTANEA

(FLASH)

## 2.1.3. EQUILIBRIO INSTANTANEO (Pias) PARA MULTICOMPO -- NENTEA.

BASE

$$X_r = \frac{Z_r}{p + K_r (1 - p)}$$

$$Y_r = K_r X_r$$

### NOMENCLATURA:

$X_r$  = % mol del componente  $r$  en la fase líquido en equilibrio.

$Y_r$  = % mol del componente  $r$  en la fase vapor en equilibrio.

$Z_r$  = % mol del componente  $r$  en la mezcla total

$p$  = moles totales del líquido por mol total de la mezcla en --  
equilibrio.

$K_r$  = constante de vaporización en equilibrio, para el compo--  
nente  $r$ .

### OBSERVACIONES:

El valor mínimo de la escala  $Z$  es 10, pero si el % del compo--  
nente de la mezcla es menor de 10, habrá que multiplicarlo --  
por 10 ó 100, dividiendo los correspondientes valores de  $V_r$  y  
 $W_r$  entre 10 ó 100 respectivamente.

Los valores menores de 0,1 en la escala  $V$  y  $W$  ya son quitados  
de este nomograma, ya que su aproximación no lo permite.

Estos nomogramas son para calcular  $p$ ,  $X_r$  y  $Y_r$ .

MODO DE USARSE: Se explicará con el ejemplo, ya que se tienen que --

hacer varias operaciones con regla de cálculo.

**EJEMPLO:** Calcular X y Y para la siguiente mezcla:

| Componente | $Z_r$ | $K_r$ |
|------------|-------|-------|
| 1          | 9.7   | 5.478 |
| 2          | 35.1  | 1.395 |
| 3          | 21.4  | 0.823 |
| 4          | 19.9  | 0.504 |
| 5          | 13.9  | 0.042 |

**Solución:** El primer paso es calcular V y W con el nomograma 1 para cada componente, ó sea la figura 22.

El nomograma 1 se usa de la siguiente forma: Se unen por medio de una línea recta los valores de  $K_r$  y  $Z_r$ , leyéndose inmediatamente los valores de V y W correspondientes, esto es para cada uno de los componentes de la mezcla.

Llevando a cabo lo anterior obtenemos los siguientes resultados:

| Componente | $V_r$ | $W_r$ |
|------------|-------|-------|
| 1          | 1.5   | 0.2   |
| 2          | 14.7  | 6.1   |
| 3          | 11.8  | 6.5   |
| 4          | 13.2  | 8.9   |
| 5          | 13.4  | 11.0  |
|            | 54.6  | 34.7  |

hacer varias operaciones con regla de cálculo.

**EJEMPLO:** Calcular X y Y para la siguiente mezcla:

| Componente | $Z_r$ | $K_r$ |
|------------|-------|-------|
| 1          | 9.7   | 5.478 |
| 2          | 35.1  | 1.395 |
| 3          | 21.4  | 0.823 |
| 4          | 19.9  | 0.504 |
| 5          | 13.9  | 0.042 |

**Solución:** El primer paso es calcular V y W con el nomograma 1 para cada componente, ó sea la figura 22.

El nomograma 1 se usa de la siguiente forma: Se unen por medio de una línea recta los valores de  $K_r$  y  $Z_r$ , leyéndose inmediatamente los valores de V y W correspondientes, esto es para cada uno de los componentes de la mezcla.

Llevando a cabo lo anterior obtenemos los siguientes resultados:

| Componente | $V_r$ | $W_r$ |
|------------|-------|-------|
| 1          | 1.5   | 0.2   |
| 2          | 14.7  | 6.1   |
| 3          | 11.8  | 6.5   |
| 4          | 13.2  | 8.9   |
| 5          | 13.4  | 13.0  |
|            | 54.6  | 34.7  |

En este punto se usa la figura 22; para obtener p

Este nomograma se usa: con la  $\Sigma V$  y  $\Sigma W$  se traza una -  
recta viendo la intersección en el eje p, leyendo la respuesta.

Unimos 54.6 y 54.7 en sus respectivas escalas y leemos:

$$p = 0.73$$

Posteriormente se resuelven las siguientes ecuaciones:

$$X_r = \frac{Z_r}{p + K_r (1-p)} \quad Y_r = K_r X_r$$

Esta solución se hace a base de la regla de cálculo, efectuando  
todas las operaciones. Así obtenemos la siguiente tabla:

| Componente | (1)<br>$K_r$ | (2)<br>$0.27 K_r$ | (3)<br>$0.27 K_r + 0.73$ | (3)/(2)<br>$Z_r$ | (3)/(2)<br>$X_r$ |
|------------|--------------|-------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| 1          | 5.478        | 1.4791            | 2.2091                   | 9.7              | 4.4              |
| 2          | 1.395        | 0.3766            | 1.1066                   | 35.1             | 31.7             |
| 3          | 0.823        | 0.2222            | 0.9522                   | 21.4             | 22.5             |
| 4          | 0.504        | 0.1361            | 0.8661                   | 19.9             | 23.0             |
| 5          | 0.042        | 0.0113            | 0.7413                   | 13.9             | 18.8             |

| Componente | (1) x (3)/(2)<br>$Y_r$ | (4)<br>$Y_r - X_r$ | (4)/(2)<br>$C_r$ |
|------------|------------------------|--------------------|------------------|
| 1          | 24.1                   | 19.7               | 8.9              |
| 2          | 44.2                   | 12.5               | 11.3             |
| 3          | 18.5                   | 4.0                | 4.2              |

| Componente | (1) x (3)/(2)<br>$Y_r$ | (4)<br>$Y_r - X_r$ | (4)/(2)<br>$C_r$        |
|------------|------------------------|--------------------|-------------------------|
| 4          | 11.6                   | - 11.4             | - 13.2                  |
| 5          | $\frac{0.8}{99.2}$     | - 15.0             | $\frac{- 24.3}{- 21.5}$ |

Como  $X_r = 100.4$        $Y_r = 99.2$  hay un error y hay que corregir --  
"p" con la siguiente ecuación:

$$p = \frac{100 - \sum X_r}{C_r}$$

$$C_r = \frac{Y_r - X_r}{p + K_r(1-p)} = \frac{X_r(K_r - 1)}{p + K_r(1-p)}$$

Haciendo la corrección por  $\Delta p$  encontramos que  $\Delta p = + 0.02$   
 $p = 0.73 + 0.02 = 0.75$

Con esta nueva p, volvemos a calcular las ecuaciones y encontramos:

| Componente | $X_r$                | $Y_r$               |
|------------|----------------------|---------------------|
| 1          | 4.4                  | 24.1                |
| 2          | 31.6                 | 44.7                |
| 3          | 22.4                 | 18.7                |
| 4          | 22.9                 | 11.7                |
| 5          | $\frac{18.7}{100.0}$ | $\frac{0.8}{100.0}$ |

Por lo tanto, ya son las respuestas correctas.



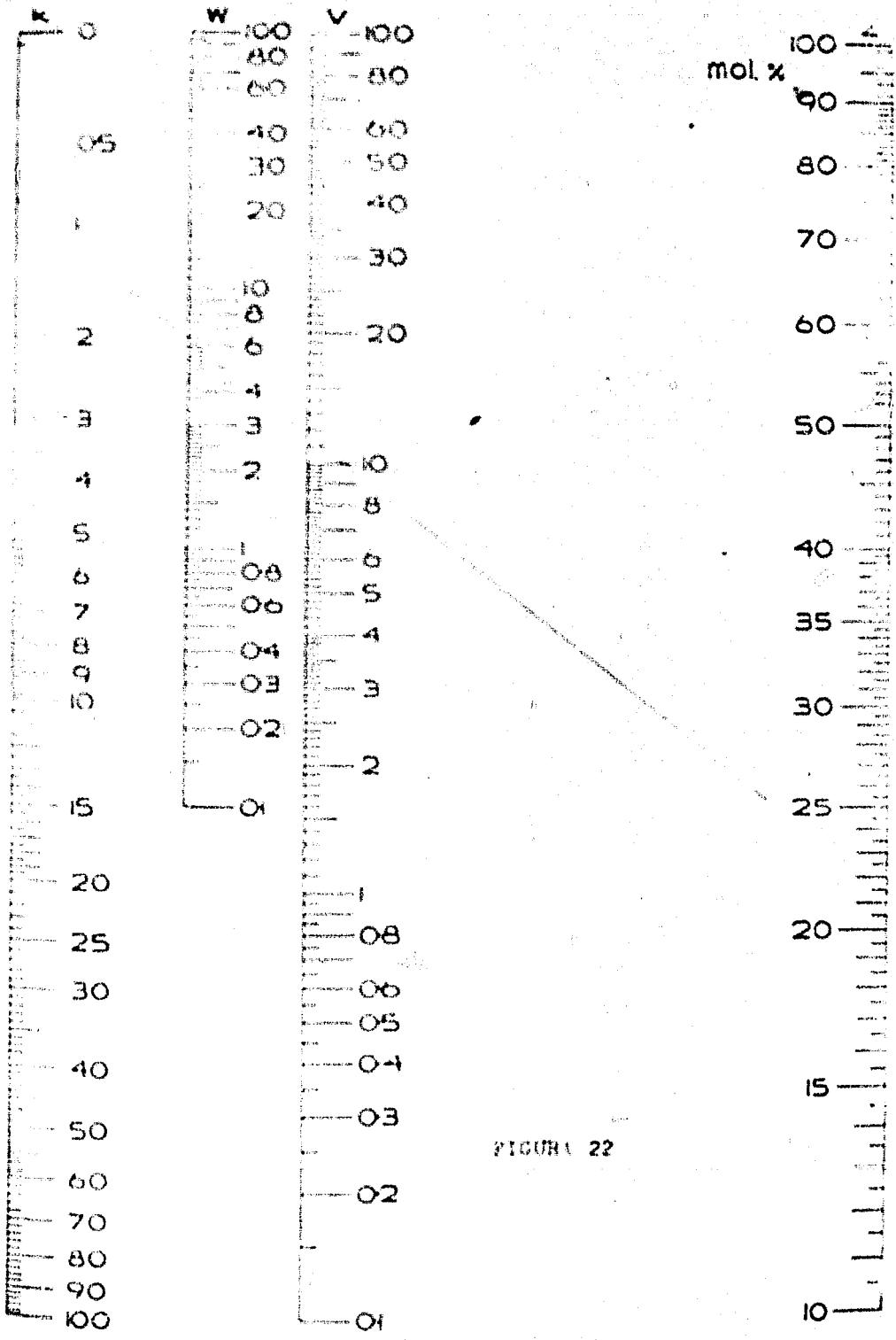


FIGURA 22

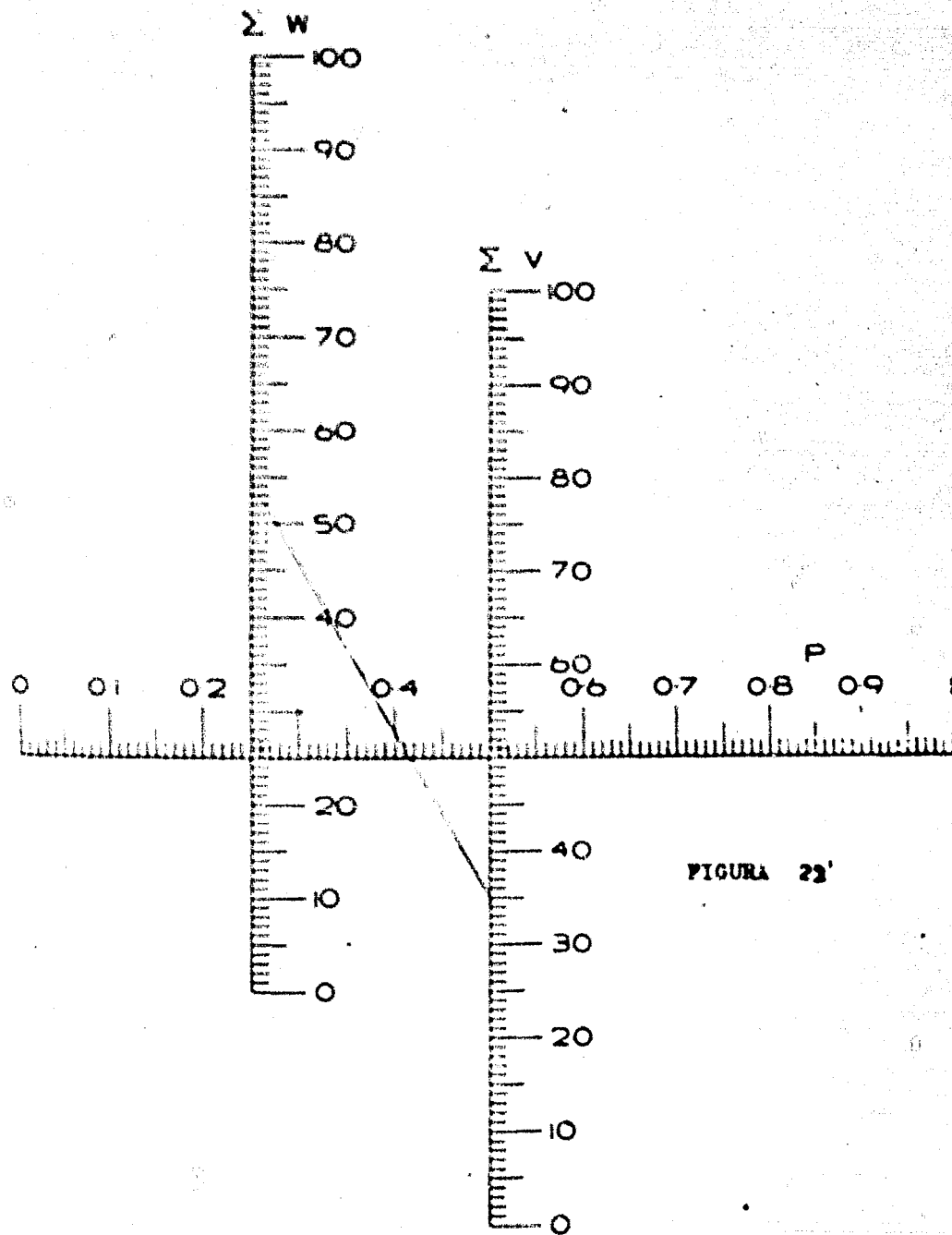


FIGURA 23'

## 2.2.b. - DESTILACION INSTANTANEA (FLASH) PARA MULTICOMPONENTES.

BASE: ecuación de Dodge:

$$y_i = \frac{x_{fi}}{r + (1-r)/K_i}$$

### NOMENCLATURA:

- $y_i$  \* fracción mol del componente i en el vapor.
- $x_i$  \* fracción mol del componente i en el residuo.
- $x_{fi}$  \* fracción mol del componente i en la alimentación.
- $K_i$  \* cte. de equilibrio del componente i
- $F$  \* número de moles en la alimentación.
- $V$  \* número de moles en el destilado.
- $L$  \* número de moles en el residuo.
- $r$  \* fracción destilada.

### OBSERVACIONES:

Este nomograma da un error relativo del 2%; si se desea mayor exactitud, se puede obtener nomográficamente la primera aproximación y continuar analíticamente.

La exactitud también depende de los valores de  $K$ . Para casos prácticos el uso del nomograma es justificado y bastante adecuado.

Este método es iterativo, pero con el nomograma se hace infinitamente más rápido.

El valor de  $R$  ó  $r$  está dado por la relación  $V/F$

## MODO DE USARSE:

1. - Suponer de la fracción destilada  $r$ , y encontrar la curva correspondiente a ese valor.
2. - Para el valor apropiado de  $K$  de cada componente, trazar una línea vertical hasta cruzar la curva de  $r$ .
3. - Llevar este punto horizontalmente hasta la línea pivote.
4. - Este punto se une con el valor de la concentración en la alimentación,  $x_i$ , y prolongar la línea hasta cortar con la escala de la composición en el vapor y así obtenemos los valores de  $y_i$ .
5. - Después de obtener los valores de  $Y_i$  se suman y deben de chequear con el valor de uno, habiendo checado este valor -- se calculan los valores de  $x$  por la ecuación  $x_i = y_i/K_i$  y posteriormente se suman, teniendo que dar también el valor de 1.

## EJEMPLO:

Se tiene una mezcla de hidrocarburos, conteniendo: 12.5% de metano, 15% de etano, 20% de propano, 10% de isobutano, 15% de n-butano, 10% de isopentano, 10% de n-pentano, y 7.5% de hexano. Suponga que la mezcla es flasheada a 50 atm. y a -- 200°F. En la tabla siguiente se verán los cálculos para cada valor de  $r$  supuesta y también se dan ahí los valores de las  $K$  correspondientes.

| Componente                       | $x_l$ | K     | $r = 0.5$  | 0.4        | 0.3        | 0.34       | %           |
|----------------------------------|-------|-------|------------|------------|------------|------------|-------------|
|                                  |       |       | %<br>y     | %<br>y     | %<br>y     | %<br>y     | %<br>x      |
| CH <sub>4</sub>                  | 0.125 | 6.30  | 21.6       | 25.2       | 30.4       | 28.1       | 4.5         |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 0.150 | 2.35  | 21.0       | 22.9       | 25.1       | 24.1       | 10.3        |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 0.200 | 0.85  | 18.4       | 18.1       | 17.8       | 18.1       | 21.3        |
| i C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0.100 | 0.67  | 8.0        | 7.7        | 7.4        | 7.5        | 11.2        |
| n C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0.150 | 0.61  | 11.4       | 10.9       | 10.4       | 10.6       | 17.3        |
| i C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0.100 | 0.40  | 5.7        | 5.3        | 4.9        | 5.0        | 12.4        |
| n C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0.100 | 0.345 | 5.1        | 4.5        | 4.3        | 4.4        | 12.9        |
| C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>   | 0.075 | 0.214 | <u>2.6</u> | <u>2.3</u> | <u>2.1</u> | <u>2.2</u> | <u>10.2</u> |
|                                  |       |       | 93.8       | 96.9       | 102.4      | 100.0      | 100.0       |

El nomograma trae el siguiente ejemplo: encontrar el valor de:

y para cuando  $K = 0.051$ ,  $r = 0.89$  y  $x_l = 0.07$

Como resultado dá:  $y = 0.0237$ .

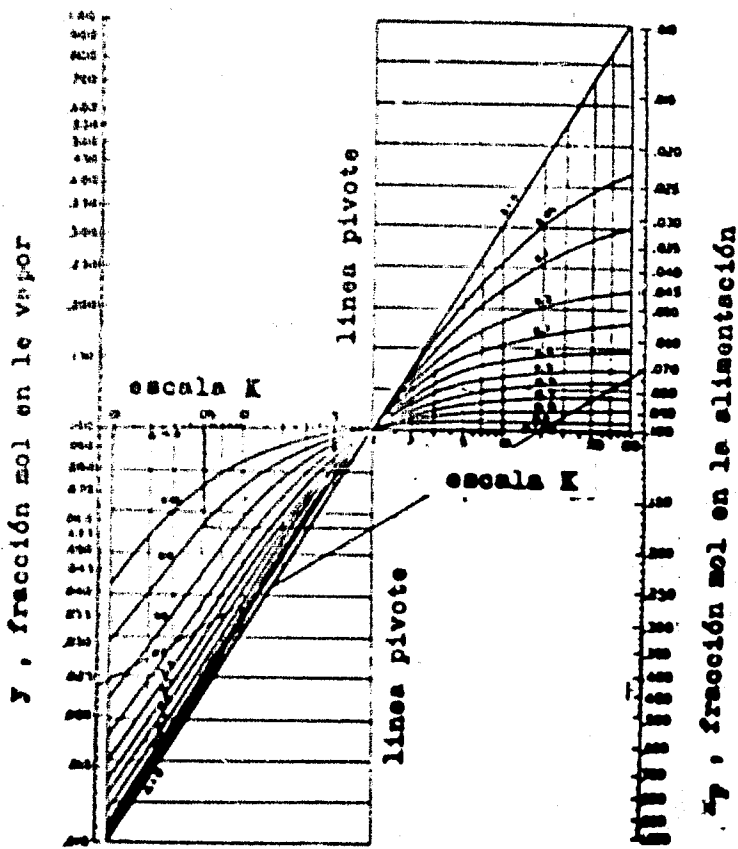


FIGURA 23

$y$  , fracción mol en le vapor

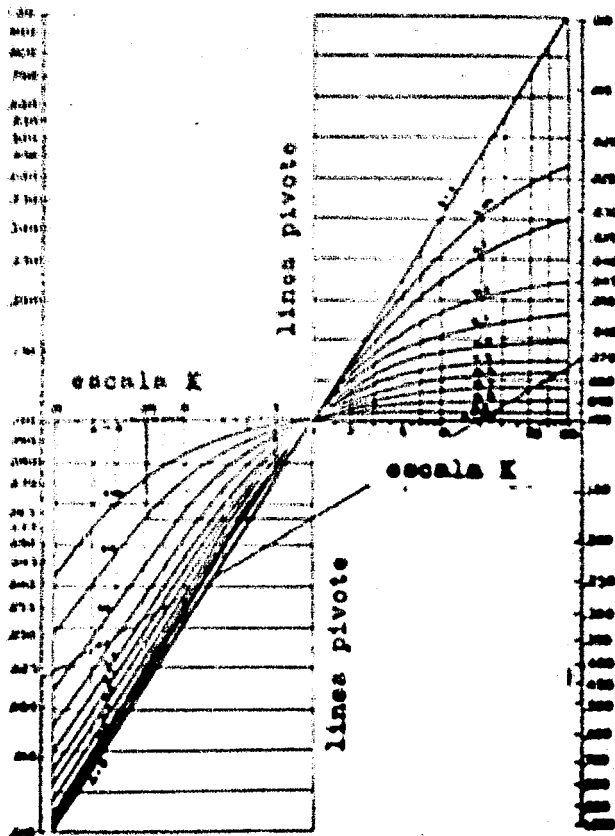


FIGURA 23

$x$  , fracción mol en la alimentación

## 2.2. e. VAPORIZACION INSTANTANEA (FLASH) DE ACEITES.

BASE:

$$V^2 \left[ V \frac{c(S_4 - S_2) + 100 S_2 m + H}{m(S_2 - S_4)} \right] + \frac{(100 - V_1)S_1T_1 - 100S_2c + V_1S_3T_1}{m(S_2 - S_4)} = 0$$

NOMENCLATURA:

- H \* Calor latente del aceite vaporizado, en BTU/gal.
- V \* Volumen total de aceite vaporizado por 100 galones de carga como galones de carga vaporizados.
- V<sub>1</sub> \* Volumen de vapor en la carga por 100 galones de carga, como galones de carga vaporizado.
- T<sub>1</sub> \* Temperatura de carga, en F
- T<sub>2</sub> \* Temperatura después de la vaporización instantánea -- (flashing), F.
- S<sub>1</sub> \* C<sub>p</sub> del aceite antes de la vaporización, en BTU/galón.
- S<sub>2</sub> \* C<sub>p</sub> del aceite después de la vaporización, en BTU/galón
- S<sub>3</sub> \* C<sub>p</sub> del vapor antes de la vaporización, en BTU/galón.
- S<sub>4</sub> \* C<sub>p</sub> del vapor después de la vaporización, en BTU/galón.
- m \* etc.
- c \* etc.
- A \* función definida por la ecc. (1)
- B \* función definida por la ecc. (2) ó (3)



## OBSERVACIONES:

$$\text{ecc. (1)} \quad A = \frac{c(S_4 - S_2) + 100 S_2 m + H}{m (S_2 - S_4)}$$

$$\text{ecc. (2)} \quad B = \frac{S_1 T_1 (100 - V_1) - 100 S_2 c + V_1 S_3 T_1}{m (S_2 - S_4)}$$

$$\text{ecc. (3)} \quad B = \frac{100 (S_1 T_1 - S_2 c)}{m (S_2 - S_4)}$$

Este nomograma es para encontrar  $V$ , resolviendo la ecuación cuadrática  $V^2 - AV + B = 0$ .

Si la alimentación es completamente líquida  $V_1 = 0$  y nos queda la ecuación 3.

La ecuación derivada aquí, permite un cálculo simple y directo del vapor producido en el flasheo de un aceite. La relación usada -- cuando queremos calcular el efecto de la reducción de presión en un aceite ó en la mezcla de un aceite y vapor, pero esto restringe a aquellos -- aceites cuya curva de evaporación flash es una recta sobre el rango de -- las condiciones involucradas.

## MODO DE USARSE:

1. - Se calculan los valores de A y de B.
2. - Se unen estos dos valores, por medio de una línea recta, cruzando así el valor de V.

## EJEMPLO

Un aceite crudo de Sp. Gr. 0.865 a 60 grados F; está a una --

presión suficientemente alta que lo mantiene líquido a una temperatura de 600 grados F. Este crudo es vaporizado instantáneamente dentro de un recipiente cuya presión es mantenida a 65 lb/in<sup>2</sup> absolutas. Del 10 al 70 % de la porción de la curva de vaporización instantánea del aceite, a la presión anterior es una línea recta, la cual puede representarse como:  $T_2 = 8.4 V + 291$ . Encontrar cual es el porcentaje de vaporización.

Si asumimos que 40% fué vaporizado, el Sp. Gr. del aceite vaporizado es 0.75 y el del residuo es 0.94. Los calores específicos a 600 grados F serán 0.62 y 0.71 respectivamente, y el del aceite crudo es de 0.78. El calor latente de vaporización es de 124 BTU/lb:

- Así tenemos
- H = 895 BTU/ galón
  - $V_1 = 0$
  - T = 600°F
  - $S_1 = 5.6$  BTU/ galón
  - $S_2 = 5.7$  BTU/ galón
  - $S_4 = 3.9$  BTU/ galón
  - c = 291°F
  - m = 8.4

Sustituyendo estos valores en la ecuación base tenemos:

$$V^2 + 111 V + 11,200 = 0$$

Con estos valores de A y de B entramos al nomograma y encontramos que el porcentaje de evaporación es de 10.

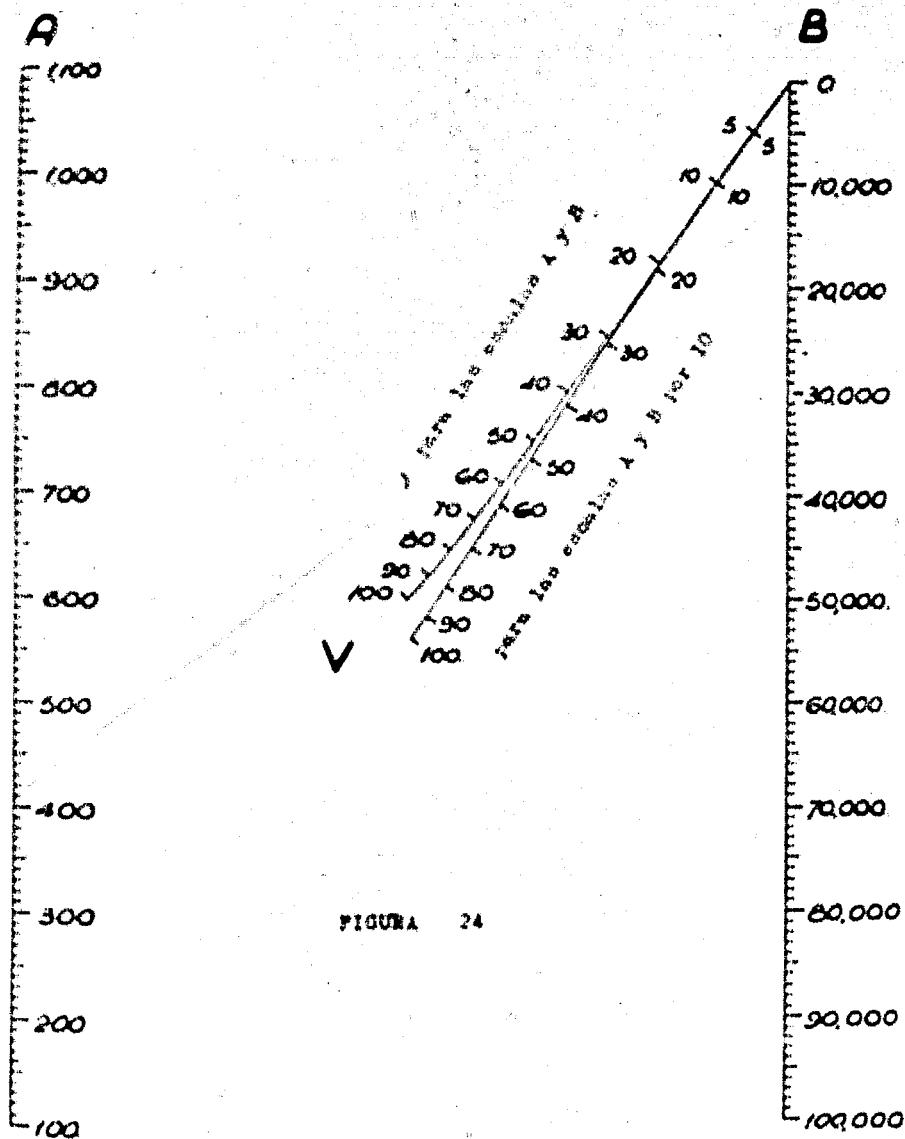


FIGURA 24

## 2.1. - DESTILACION INTERMITENTE.

### 2.3.a. - DESTILACION SIMPLE INTERMITENTE. -

(Cálculo de la fracción mol del componente más ligero en el residuo).

BASE: Teórica

$$\ln \frac{L_1}{L_2} = \frac{1}{\alpha - 1} \left( \ln \frac{X_1}{X_2} + \ln \frac{1 - X_2}{1 - X_1} \right)$$

NOMENCLATURA:

$L_1$  • moles de carga original

$L_2$  • moles del residuo.

$X_1$  • fracción mol ó fracción peso del componente ligero en la carga original.

$X_2$  • fracción mol ó fracción peso del componente ligero en el residuo.

$\alpha$  • volatilidad relativa.

OBSERVACIONES: Este nomograma elimina el error experimental y el error necesario en la solución de la ecuación.

MODO DE USARSE:

- 1.- El punto inicial es en la escala de las X
- 2.- De este punto se traza una línea vertical hasta cruzar con el valor de la  $\alpha$  solicitada (parte inferior de la gráfica), se obtiene un punto.
- 3.- De este último punto se traza una línea horizontal hasta llegar a la línea  $X_1$ .

4. El punto obtenido en la línea  $X_1$  se une por medio de una línea con el valor de la relación  $L_2/L_1$ , prolongándose la línea hasta cruzar con la vertical  $X_2$ .
5. Obtenido este cruce, se hace pasar la línea por el punto fijo o "KEY POINT" hasta llegar a la línea 1.
6. Con el punto obtenido al cruzar la línea 1, se traza una horizontal hasta el valor de  $\alpha$  requerido, obteniéndose una intersección.

Este punto obtenido por la intersección se baja verticalmente hasta el eje de las  $X_1$ , obteniéndose así la respuesta.

Todo esto se hace para encontrar el valor de  $X_2$ , pero también se puede obtener el valor de  $X_1$ , siguiendo el sentido inverso de las indicaciones anteriores.

#### EJEMPLO:

Estimar el valor de  $X_2$  para el siguiente caso:

$$X_1 = 0.8$$

$$\alpha = 2$$

$$L_2/L_1 = 0.044$$

Siguiendo las indicaciones anteriores tenemos:

De 0.80 sobre la escala  $X_1$ , vaya verticalmente a  $\alpha = 2$  y horizontalmente a  $X_2$ . Una este punto con 0.044 sobre la escala  $L_2/L_1$  y continúe a la escala  $X_2$ : pase por el punto fijo y continúe a la escala 1: proceda horizontalmente a  $\alpha = 2$  y ver

ticalmente acia abajo a la escala X; y se lee 0.36 .

Por lo tanto, la fracción mol del componente ligero en el residuo es de 0.36.

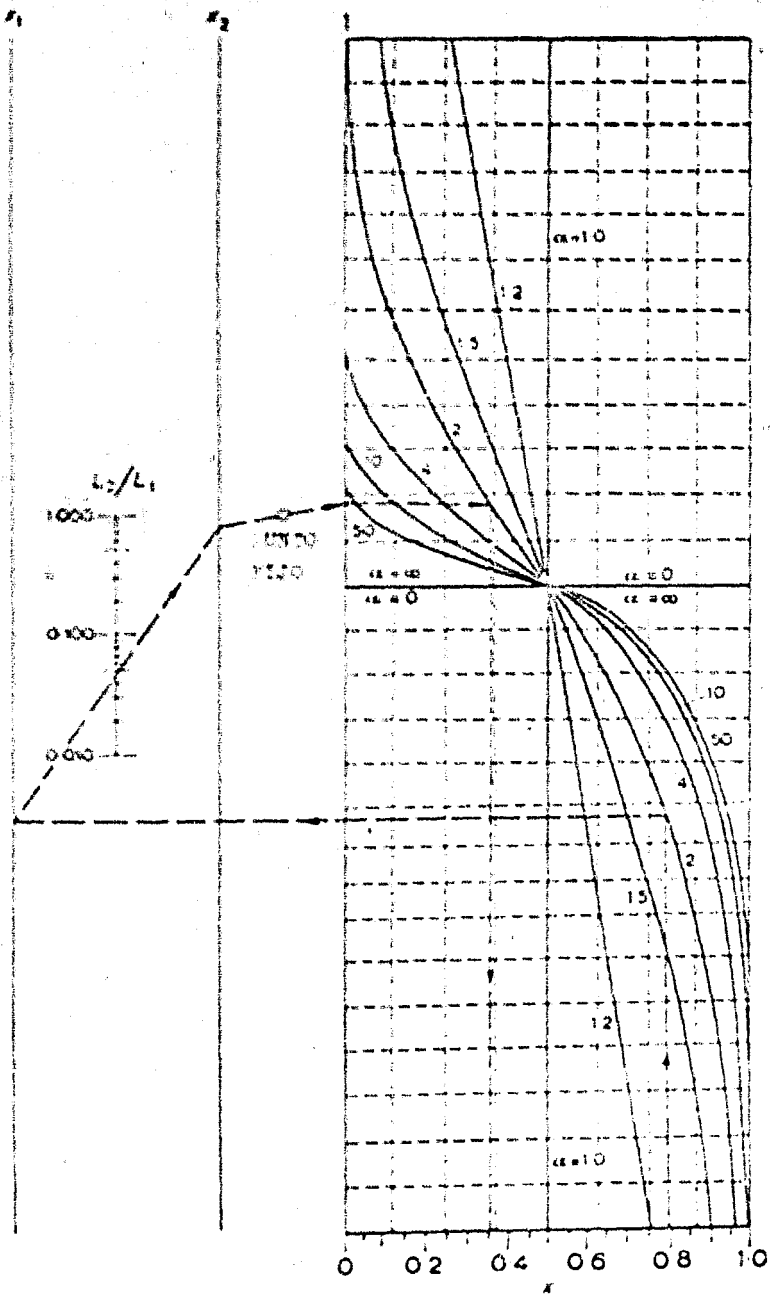


FIGURA 25



2.3.b. - DESTILACION POR ARRASTRE DE VAPOR EN UN PROCESO INTERMITENTE. -

BASE:

$$S = \left( \frac{P}{EP_b} - 1 \right) (B_1 - B_2) + \frac{P_0}{EP_b} \ln \frac{B_1}{B_2}$$

NOMENCLATURA:

- S • moles totales de vapor usado.
- B • moles totales del componente volátil presente en el destilado en un tiempo dado.
- B<sub>0</sub> • moles totales del componente no volátil en el destilado.
- P<sub>b</sub> • presión de vapor del componente volátil puro.
- P • presión total
- E • eficiencia de vaporización =  $\frac{P_b \text{ actual}}{P_b \text{ equilibrio}}$
- P<sub>0</sub> • presión parcial del componente volátil.

OBSERVACIONES:

Se usa para la destilación por arrastre de vapor de un componente volátil de una solución, en un líquido no volátil.

La derivación de la ecuación anterior asume que: el componente no volátil, presente en gran cantidad y que el componente volátil siga la ley de Raoult.

El nomograma es particularmente usado cuando B<sub>2</sub> es desconocida, para este caso la solución de la ecuación envuelve error de experimentación.

MODO DE USARSE: 1. - Para calcular el vapor requerido, unir el pun

to sobre la línea de  $P/EP_b$ , con los dos puntos conocidos sobre el eje  $B/O$ , y leer el valor correspondiente a  $S/O$ ; la diferencia entre estos valores multiplicados por 0 nos dá el vapor requerido.

2. - Para calcular  $B_2/O$  trazar una línea uniendo los valores de  $P/EP_b$  y  $B_1/O$  y leer  $S_1/O$ . Restar  $S/O$  (relación de moles de vapor usados, a el número de moles del componente no volátil) de  $S_1/O$  y obtenemos  $S_2/O$ , y uniendo este valor con el valor de  $P/EP_b$  obtenemos el valor de  $B_2/O$ .

#### EJEMPLO:

Estimar el valor de  $B_2/O$  para el siguiente caso:

$$P/EP_b = 5, \quad B_1/O = 2, \quad S/O = 2.05$$

Uniendo el valor de 5 con el valor de 2 obtenemos que  $S_1/O$  es igual a 11.4

$$\text{Así: } S_2/O = 11.4 - 2.05 = 9.35$$

Uniendo los valores de 9.35 con el de 5 obtenemos por medio del nomograma que:

$$B_2/O = 1.7$$

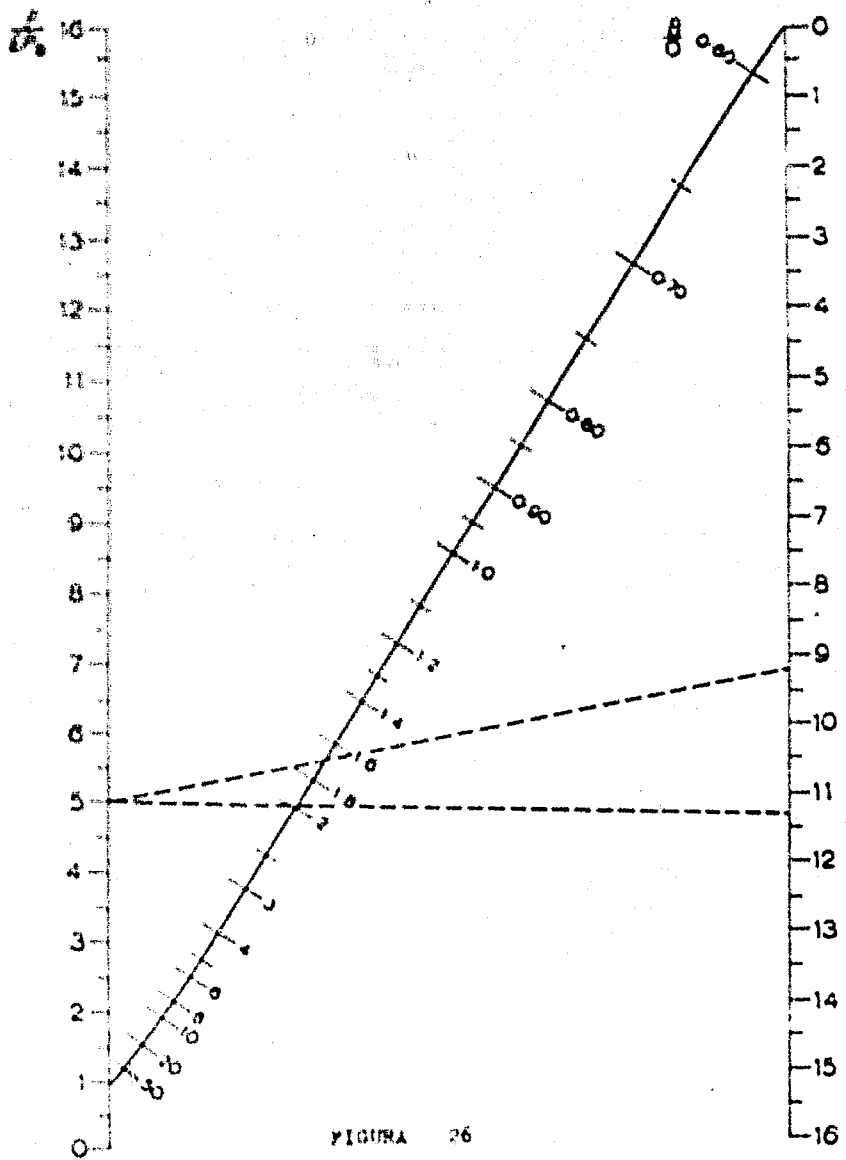


FIGURA 26

2.3.c. - DESTILACION INTERMITENTE PARA MEZCLAS BINARIAS -  
O DE MULTICOMPONENTES. -

BASE: Ecuación de Rayleigh

$$\ln \frac{A_1}{A_2} = \alpha \ln \frac{B_1}{B_2}$$

NOMENCLATURA:

- $A_1$  • moles del componente A en la alimentación.
- $A_2$  • moles del componente A en el residuo.
- $B_1$  • moles del componente B en la alimentación.
- $B_2$  • moles del componente B en el residuo.
- $\alpha$  • volatilidad relativa.

OBSERVACIONES:

Alfa, se considera constante dentro del rango de variación de las temperaturas. Su limitación es debido al rango de valores dados para la volatilidad relativa.

MODO DE USARSE:

- 1.- Una el valor dado de  $A_1$  con el valor dado de  $A_2$ , continuando la línea hasta llegar al eje C.
- 2.- Unir el punto C, con cada uno de los valores dados de las volatilidades relativas, hasta llegar a la escala D.
- 3.- Cada uno de los puntos de la escala D, habrá que unirlos a los valores correspondientes de  $B_1$ , cruzando así la escala  $B_2$ , en donde se leen las respuestas.

## EJEMPLO:

Asumir una mezcla de propano, butano y pentano con las siguientes composiciones:

$$C_3 \quad 0.0$$

$$C_4 \quad 65.6$$

$$C_5 \quad 26.4$$

$$\underline{\quad 100.0}$$

Datos en % en peso.

Sobre la base de 100 lb de mezcla original, consideremos que 12.2 lb de butano se han quedado en el líquido residual, después de una destilación intermitente. Calcular la cantidad de propano y pentano en el líquido residual.

Valores promedio de volatilidades relativas, en el rango de temperaturas en consideración son de  $C_4/C_3 \quad \alpha = 0.22$ ; para  $C_4/C_5 \quad \alpha = 4.3$

Una el punto 65.6 sobre la escala  $A_1$  con 32.2 sobre la escala  $A_2$  y continúe la línea a la escala C. Una el punto de la escala C con los valores de la volatilidad relativa requeridos 4.3 y 0.22 y obtenemos dos puntos en la escala D.

Una cada uno de estos dos puntos con sus valores correspondientes sobre la escala  $B_1$ , 8 y 26.4 y leamos las respuestas en la escala  $B_2$ , que en este caso son:

$$22.5 \text{ lb de } C_5$$

$$0.11 \text{ lb de } C_3$$

Estos datos son la cantidad de libras de dichos componentes que han quedado en el residuo.

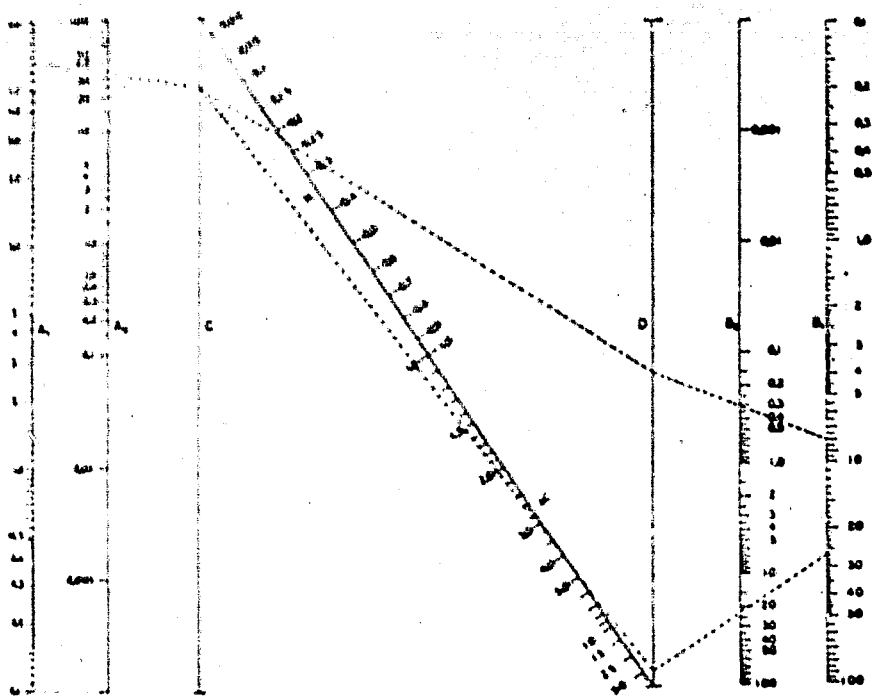


FIGURA 27

2.4. RECTIFICACION.



## 2.4.A.4.- CALCULO DE LA RELACION DE REFLUJO MINIMO. -

$$\text{BASE: } R_{m1} = \frac{1}{x_f (\alpha - 1)}$$

### NOMENCLATURA:

$R_{m1}$  = relación de reflujo mínimo externo, para número infinito de platos.

$x_f$  = fracción mol del componente ligero en la alimentación.

$\alpha$  = volatilidad relativa promedio.

### OBSERVACIONES:

- 1.- La alimentación debe estar en su punto de burbuja.
- 2.- La velocidad molar de flujo de vapor y líquido son esencialmente etes. a lo largo de la columna.
- 3.- La ecuación es rigurosamente usada para mezclas binarias donde los productos y el residuo son esencialmente puros.

### MODO DE USARSE:

Se unen los valores de  $x_f$  y  $\alpha$  obteniéndose un punto en la línea de  $R_m$ .

### EJEMPLO:

para  $x_f = 0.44$  y  $\alpha = 2.45$  encontrar el valor de  $R_m$ .

Haciendo el único paso propuesto anteriormente, encontramos

$$R_m = 1.55$$



2.4.A. - REFLUJO MINIMO.

## 2.4.A.a. - CALCULO DE LA RELACION DE REFLUJO MINIMO. -

BASE: 
$$R_m = \frac{1}{x_f (\alpha - 1)}$$

### NOMENCLATURA:

$R_m$  = relación de reflujo mínimo externo, para número infinito de platos.

$x_f$  = fracción mol del componente ligero en la alimentación.

$\alpha$  = volatilidad relativa promedio.

### OBSERVACIONES:

1. - La alimentación debe estar en su punto de burbuja.
2. - La velocidad molar de flujo de vapor y líquido son esencialmente ctes. a lo largo de la columna.
3. - La ecuación es rigurosamente usada para mezclas binarias donde los productos y el residuo son esencialmente puros.

### MODO DE USARSE:

Se unen los valores de  $x_f$  y  $\alpha$  obteniéndose un punto en la línea de  $R_m$ .

### EJEMPLO:

para  $x_f = 0.44$  y  $\alpha = 2.45$  encontrar el valor de  $R_m$ .

Haciendo el único paso propuesto anteriormente, encontramos

$$R_m = 1.55$$

1.0  
0.5  
0.1  
0.05  
0.01  
0.005  
0.001

fracción mol del componente más volátil en la alimentación.

relación de refujo mínimo

volatilidad relativa

20  
15  
10  
5  
2.0  
1.5  
1.1

FIGURA 28

500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000

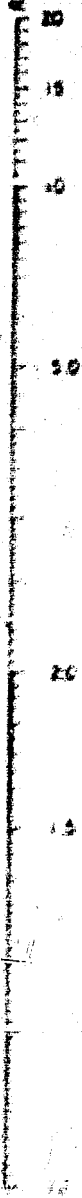
La serie de datos obtenida en esta investigación se encuentra en el anexo A de este informe.

Fracción mol del componente más volátil en la alimentación.

relación de refluxo mínimo



volatilidad relativa



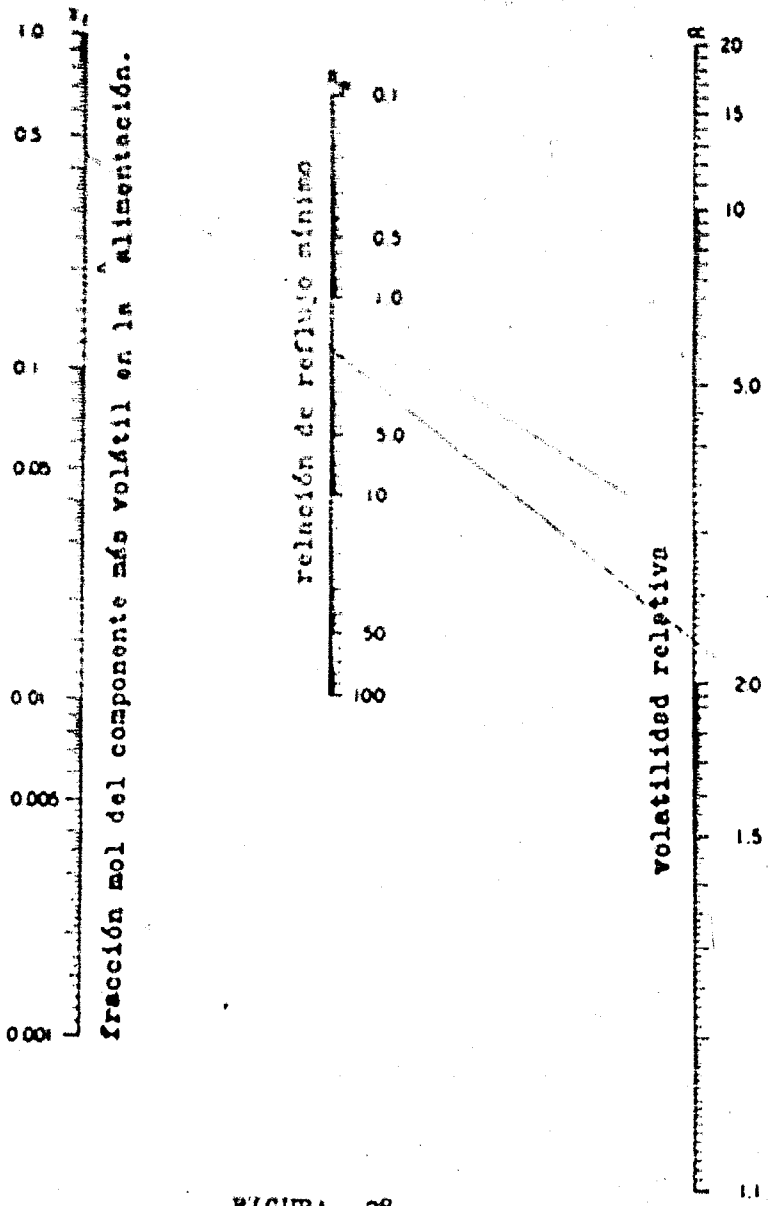


FIGURA 28

2.4.A.b. - RELACION DE REFLUJO MINIMO EN LA SEPARACION DE  
UNA MEZCLA BINARIA DE GAS IDEAL. -

BASE: Teórica:

$$\frac{R_m}{1 + R_m} = \frac{X_0 - \alpha X_f}{X_0 - X_f} \left[ 1 + (\alpha - 1) X_f \right]$$

NOMENCLATURA

$R_m$  = relación de reflujo mínimo (moles de reflujo / moles de destilado) correspondiente a número infinito de platos teóricos.

$X_0$  = fracción mol del componente más volátil en la parte superior de la torre (destilado).

$X_f$  = fracción mol del componente más volátil en la alimentación.

$\alpha$  = volatilidad relativa.

OBSERVACIONES:

La alimentación debe ser considerada líquida en su punto normal de ebullición.

MODO DE USARSE:

1. - Sobre la malla encontrar el punto alfa, y  $X_f$ .
2. - Unir este punto con el punto  $X_0$ , llevando la línea hasta -- cruzar con el eje  $R_m$  y leer la respuesta.

EJEMPLO:

Estimar el reflujo mínimo, para el caso de una alimentación -

que contenga 95% molar del componente más volátil, con una

$\alpha$  de 2.27, y que tenga que el destilado tenga un 99.2% molar del componente más volátil.

Según de las indicaciones anteriores calculamos que  $R_{mín} =$

1.5. Es decir necesitamos 1.5 molar de refluxo, por cada molar de destilado que obtengamos.

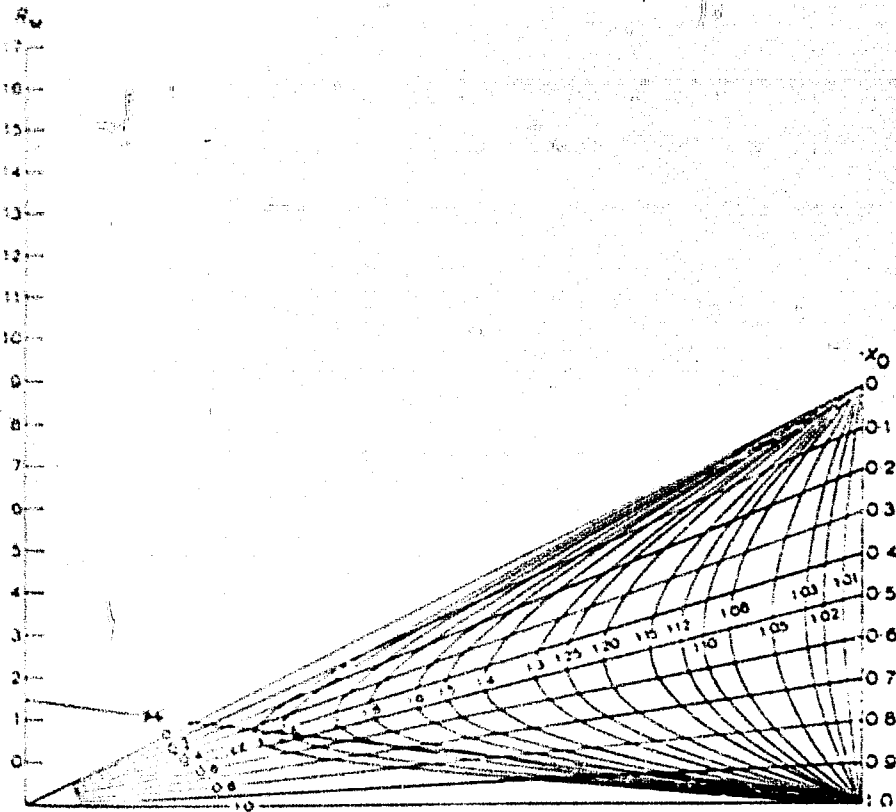


FIGURA 19



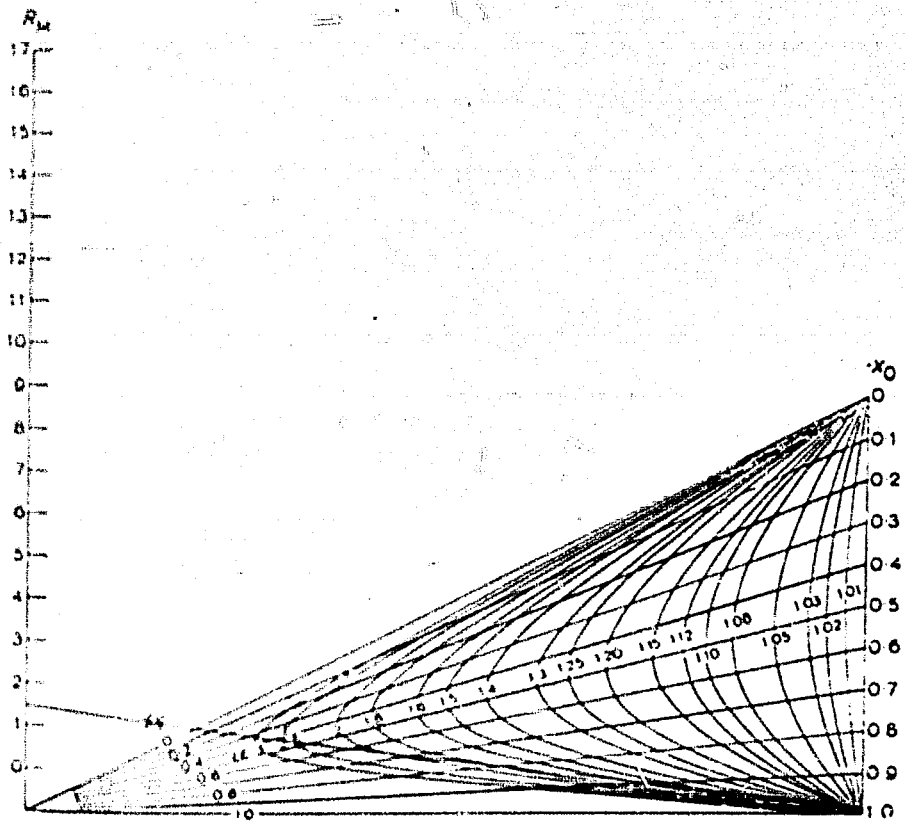


FIGURA 29

## 2.4. A. c. - RELACION DE REFLUJOS. -

BASE: Empírica. Correlación de Gilliland:

$$\frac{S - S_m}{S + 1} = f \left( \frac{R - R_m}{R + 1} \right)$$

### NOMENCLATURA:

- S = Número de platos teóricos.
- R = Cualquier relación de reflujo.
- S<sub>m</sub> = Número mínimo de platos teóricos.
- R<sub>m</sub> = Relación mínima de reflujo.

OBSERVACIONES: ninguna.

### EJEMPLO:

Si la relación de reflujo mínimo es de 2.0 y el número mínimo de platos teóricos es de 20; calcular el número de platos teóricos requeridos si es usada una relación de reflujo 1.5 veces el mínimo.

### MODOS DE USARSE Y SOLUCION:

$$R = 1.5 \times 2.0 = 3.0$$

- 1.- Una el valor de 2.0 de la escala R<sub>m</sub> con el valor de 3.0 de la escala diagonal R y extendiéndola hasta cortar la línea de unión 1.
- 2.- Transfiere este valor paralelamente a las líneas marcadas, hasta la línea de unión 2.
- 3.- Una esta punto de la línea de unión 2, con el valor de 20 en

la escala  $S_{em}$  hasta cortar con la escala diagonal  $S$ .

Haciendo todo este procedimiento encontramos que  $S = 35$  y el valor calculado por medio de la relación sería 34.9; lo cual podemos decir que este nomograma es de una confiabilidad absoluta.

Número de platos teóricos requeridos serán 35.

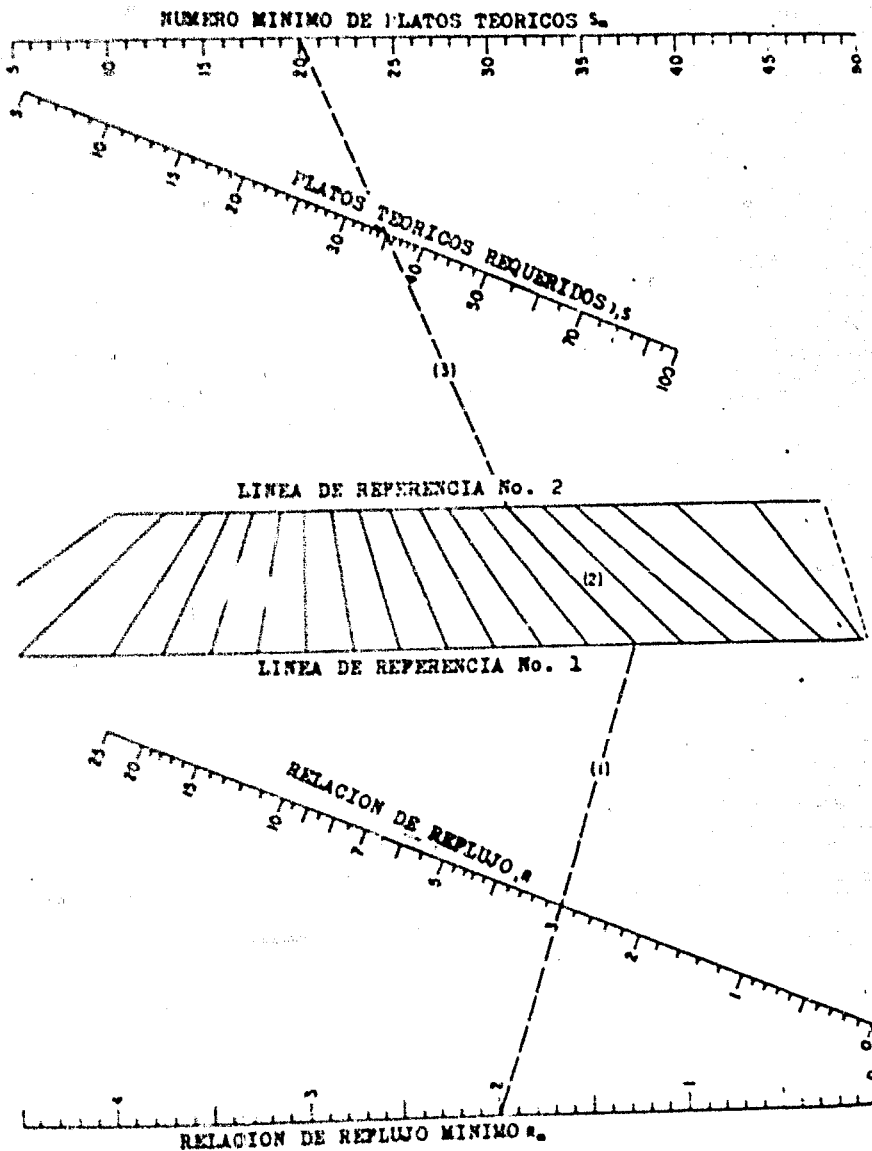


FIGURA 30

**2.4. B. - NUMERO MINIMO DE PLATOS TEORICOS.**

## 2.4. B. a. - NUMERO MINIMO DE PLATOS DE UNA COLUMNA DE RECTIFICACION A REFLUJO TOTAL. -

BASE:

$$N_m = \frac{\log \frac{x_0 (1-x_f)}{x_f (1-x_0)}}{\log \alpha}$$

NOMENCLATURA:

- $N_m$  = número mínimo de platos teóricos a reflujo total.
- $x_0$  = fracción mol del componente más volátil en el dest.
- $x_f$  = fracción mol del componente más volátil en la alim.
- $\alpha$  = volatilidad relativa de los dos componentes.

OBSERVACIONES:

1. - En general, la volatilidad relativa puede usarse la media aritmética de las temperaturas del evaporador y en la parte superior de la columna. Si las variaciones de la volatilidad relativa son de cierta consideración, se recomienda el uso de la media geométrica.
2. - Si se usa un condensador total, el número de platos teóricos debe reducirse en una unidad y si se emplea un condensador parcial, equivalente a un plato teórico, el número de estos debe reducirse en dos unidades.

MODO DE USARSE:

1. - Se une por medio de una línea, la escala  $x_0$  y  $x_f$ , prolongándola hasta cruzar con la línea  $\beta$

2. Se une el valor correspondiente a  $\alpha$  con el punto encontrado en  $\beta$ , cruzando así la escala de número mínimo de platos teóricos, a reflujo total.

#### EJEMPLO:

Si  $\alpha = 2.7$ ,  $x_D = 0.99$ , y  $0.60 = x_1$ , encontramos que:

$$N_m = 4.1$$

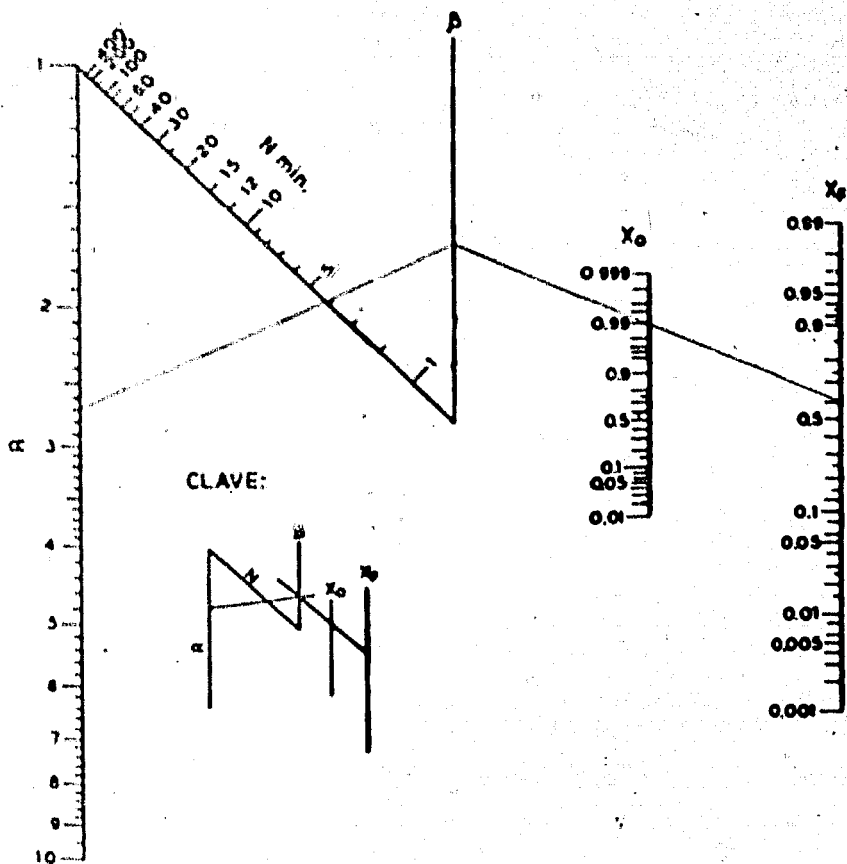


FIGURA 31



2.4. B. b. - NUMERO MINIMO DE PLATOS TEORICOS CON REFLUJO TOTAL. -

BASE:

Ecuación de Fenske:

$$N = \frac{\log \left( \frac{X_d / 1 - X_d}{\log \alpha} \right)}{\log \alpha} = \frac{\log \left( \frac{X_b / 1 - X_b}{\log \alpha} \right)}{\log \alpha}$$

NOMENCLATURA:

$X_d$  = fracción mol en el destilado

$X_b$  = fracción mol en el residuo

$\alpha$  = volatilidad relativa

$N$  = número mínimo de platos teóricos

OBSERVACIONES:

La exactitud de este nomograma, es dada por la exactitud de la ecuación.

EJEMPLO:

Si nosotros tenemos una mezcla de dos líquidos con una  $\alpha$  de 1.5, y queremos que el destilado tenga una fracción mol del componente más volátil de 0.95 y en el residuo, que tenga 0.1, sabiendo que estamos a reflujo total, encontrar el número mínimo de platos teóricos.

Solución:

usando  $X_d$  y  $\alpha$ ,  $N_d = 7.3$

usando  $X_b$  y  $\alpha$ ,  $N_b = \frac{5.4}{+12.7}$

$N = 12.7$  platos teóricos.

Teniendo la misma solución líquida, ahora queremos que:

$X_d = 0.95$  y  $X_b = 0.55$ : encontrar lo mismo.

Solución:

$$\text{usando } X_d \text{ y } \alpha, N_d = 7.3$$

$$\text{usando } X_b \text{ y } \alpha, N_b = \frac{-0.5}{+6.8}$$

$N = 6.8$  platos teóricos.

FRACCION MOL DEL COMPONENTE MAS VOLATIL  
EN EL RESIDUO  $X_B$   
EN EL DESTILADO  $X_D$

NUM. MINIMO DE PLATOS  
TEORICOS A REPEUJO  
TOTAL

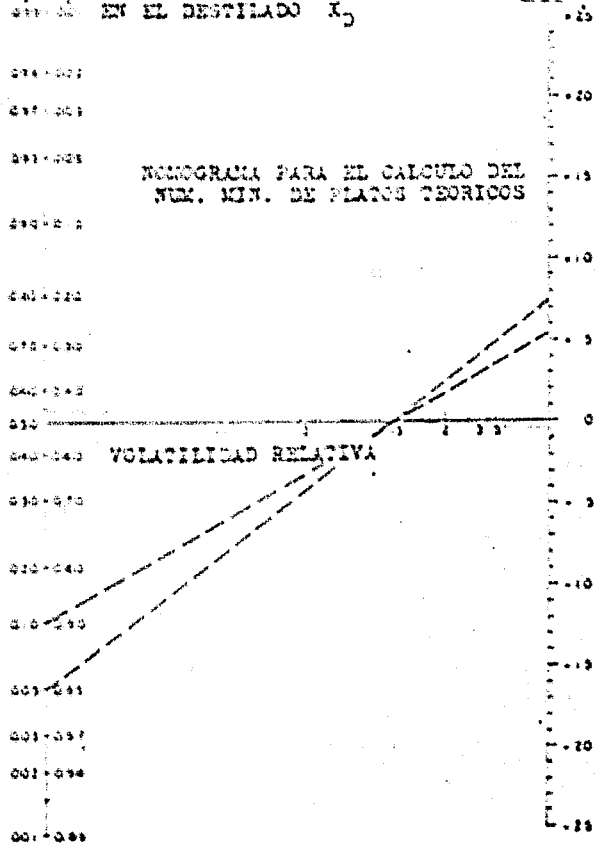


FIGURA 32

## 2.4. B. c. - DETERMINACION DEL NUMERO MINIMO DE PLATOS TEORICOS.

BASE: ecuación de Fenske:

$$S_m = \frac{\ln \frac{(X_1) (X_2)}{(X_4) (X_3)}}{\ln \alpha}$$

### NOMENCLATURA:

- $N_m$  • número mínimo de platos teóricos en la columna, con relación de reflujo infinito.
- $S_m$  • número mínimo de platos teóricos a reflujo total.
- $X_1$  • fracción mol del componente más volátil en el destilado.
- $X_2$  • fracción mol del componente más pesado en el residuo
- $X_3$  • fracción mol del componente más ligero en el residuo
- $X_4$  • fracción mol del componente más pesado en el destilado.
- $\alpha$  • volatilidad relativa media, del componente más volátil al componente menos volátil.
- $\alpha_T$  • volatilidad relativa del componente ligero al componente pesado en las condiciones de la parte superior de la columna.
- $\alpha_B$  • volatilidad relativa del componente ligero al componente pesado en la parte inferior de la columna en las condiciones de operación.

## OBSERVACIONES:

- 1.- La alimentación es considerada en su punto de burbuja.
- 2.- Las velocidades molales de flujo de vapor y líquido son esencialmente constantes a lo largo de la columna.
- 3.- El método predice la separación entre dos componentes en un sistema multicomponente.
- 4.- Si se emplea un condensador total y su rehervidor, el número de platos teóricos de la columna, es uno menos que los que se hayan obtenido en el nomograma. Si es usado un condensador parcial, el número mínimo de platos teóricos en la columna es dos menos que el determinado por el nomograma. Aquí  $X_1$  y  $X_4$  vienen siendo las fracciones mol de los componentes más volátiles que se van como vapor del condensador parcial y no las fracciones de reflujo líquido o del destilado líquido.
- 5.- 
$$\alpha = \left( \frac{\alpha_T \cdot \alpha_B}{\alpha} \right)^{1/2}$$

## MODO DE USARSE:

- 1.- Se unen los valores de  $X_1$  y  $X_2$ , obteniéndose un punto en la línea  $I_1$ .
- 2.- Se unen los valores  $X_3$  y  $X_4$ , obteniéndose un punto en la línea  $I_2$ .
- 3.- Se unen los puntos obtenidos en las escalas  $I_1$  e  $I_2$  haciéndose llegar la línea hasta la escala  $I_3$ .

- 4.- El punto obtenido en la escala  $I_3$  se une con el valor de  $I_2$  en su respectiva escala, cruzando así la escala  $S_m$  en donde se lee el valor correspondiente a los platos mínimos requeridos a reflujo total.

**EJEMPLO:**

Determine el número de platos teóricos para la siguiente operación:

|         | Alim.<br>moles | $X_f$ | Destilado<br>moles | $X_d$  | Residuo<br>moles | $X_b$  |
|---------|----------------|-------|--------------------|--------|------------------|--------|
| benceno | 0.513          | 0.44  | 0.497              | 0.9745 | 0.016            | 0.0245 |
| tolueno | 0.652          | 0.56  | 0.013              | 0.0255 | 0.639            | 0.9755 |
|         | 1.165          | 1.00  | 0.510              | 1.0000 | 0.655            | 1.0000 |

La columna opera a una atmósfera de presión y se emplea un condensador total. La  $\alpha_T$  en la parte superior de la columna es determinada con las condiciones de rocío del vapor: y es

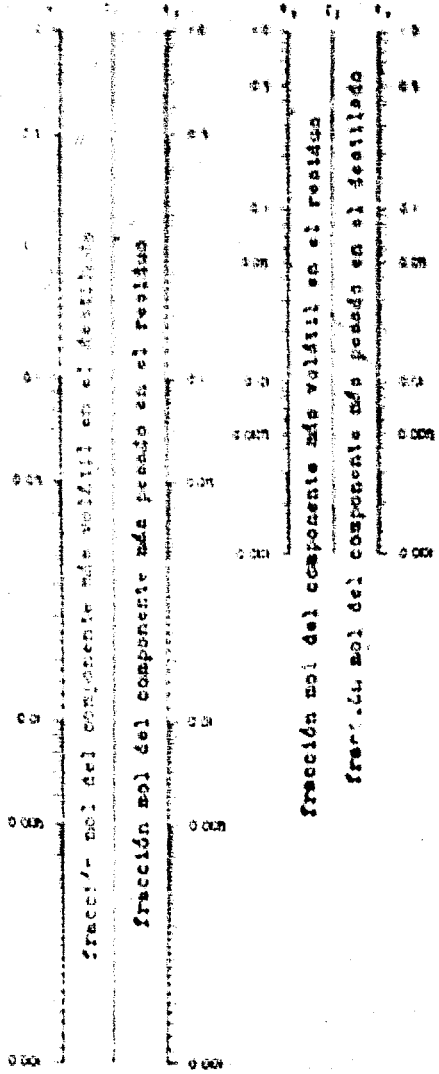
$\alpha_T = 2.58$  La  $\alpha_B$  en la parte inferior de la columna es determinada con las condiciones del punto de burbuja:

$$\alpha_B = 2.32$$

Por lo mismo  $\alpha = (2.58 \times 2.32)^{1/2} = 2.45$

Llevando a cabo todas las indicaciones anteriores, para la forma de usarse encontramos que  $S_m = 8.3$

Por lo mismo  $N_m = 8.3 - 1 = 7.3$



CLAVE  
 1-1-1-1  
 2-1-1-1  
 1-1-1-1  
 1-1-1-1

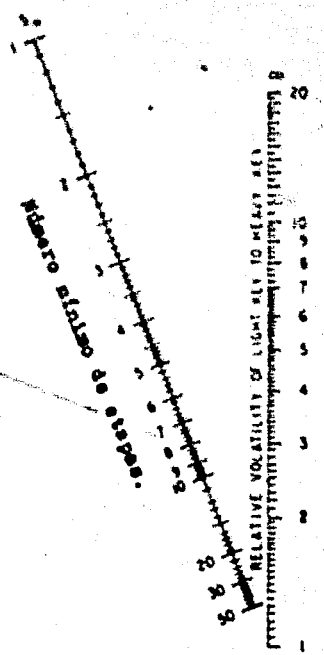


FIGURA 33

## 2.4. B. d. - NUMERO DE CONTACTOS TEORICOS

NUMERO DE PLATOS TEORICOS PARA MULTICOMPO --  
NENTFS. -

BASE: Ecuación de Fenske:

$$N_{\min} = \frac{\ln(A/B)_D (B/A)_W}{\ln \alpha}$$

### NOMENCLATURA:

$N_{\min}$  = número mínimo de contactos teóricos.

A = número de moles o libras del componente A (más vo-  
látil)

B = número de moles o de libras del componente B

D = destilado

W = residuo.

$\alpha$  = promedio de las volatilidades relativas de A y B

### OBSERVACIONES:

Se aplica a mezclas binarias o de multicomponentes.

Trata con moles o con libras, evitando las conversiones de frac-  
ción mol ó de fracción peso.

### MODO DE USARSE:

Debido a la difícil explicación teórica, preferimos explicar su-  
manejo, dentro del ejemplo.

### EJEMPLO:

Assume que una mezcla de tres componentes A, B, C se desea-  
destilar, según los datos de la siguiente tabla:



| Componente | Alimentación<br>mol/hr. | Destilado<br>mol/hr | Residuo<br>mol/hr |
|------------|-------------------------|---------------------|-------------------|
| A          | 50                      | 48.8                | 1.2               |
| B          | 40                      | 1.2                 | 38.8              |
| C          | <u>10</u>               | <u>0.0</u>          | <u>10.0</u>       |
|            | 100                     | 50.0                | 50.0              |

La volatilidad relativa promedio de A y B en el rango de temperatura que trabaja la columna es 2.0.

Solución:

Conecte el punto 48.8 de la escala  $A_D$  con el 1.2 de la escala  $B_D$  y prolongue la línea hasta la escala marcada como línea 1. Conecte el punto 38.8 de la escala  $B_W$  con el punto 1.2 de la escala  $A_W$  y continúe la línea hasta la escala marcada como línea 1.

De este último punto de la línea 1 continúe el trazo horizontalmente hasta intersectar la línea 3.

Una el punto de intersección de la línea 3 con el primer punto de intersección de la línea 1, obteniendo un punto en la línea de intersección con la línea 2.

Conecte este punto de la línea 2 con 2.0 de la escala alfa.

La intersección en la escala  $N_{\min}$  nos dá la respuesta de 10.4 contactos teóricos requeridos para la separación anterior.

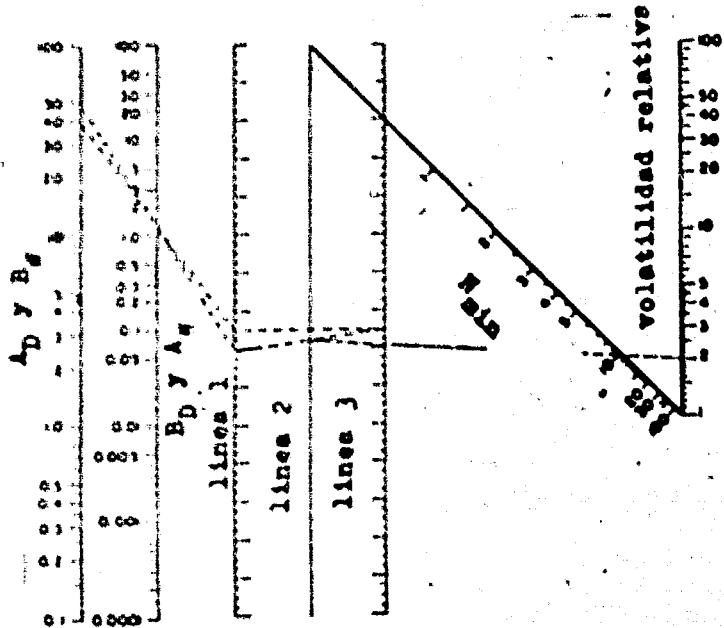


FIGURA 34

#### 2.4.C. - EFICIENCIA DE PLATO.

## 2.4.C.a. - EFICIENCIA TOTAL DE PLATO.

BASE:  $E = 41 (2 - \beta)^{-0.212}$

### NOMENCLATURA:

- E = eficiencia total de plato.
- $\alpha$  = volatilidad relativa media.
- $\beta$  = velocidad de la alimentación en  $cp$  a la temperatura promedio de la torre.

### OBSERVACIONES:

- 1.- La alimentación debe estar en las condiciones del punto de burbuja.
- 2.- Las velocidades molales de flujo de vapor y líquido son esencialmente constantes a lo largo de la columna.
- 3.- El método predice la separación entre 2 componentes en un sistema multicomponente.

### MODO DE USARSE:

Se une por medio de una línea, los valores conocidos de  $\alpha$  y  $\beta$  obteniendo un punto en la escala E.

EJEMPLO: Para una  $\alpha = 2.32$  y una  $\beta = 0.25$  encontrar la eficiencia total de plato.

Haciendo la indicación anterior, la de unir los puntos conocidos, obtenemos un valor de  $E = 70.7\%$

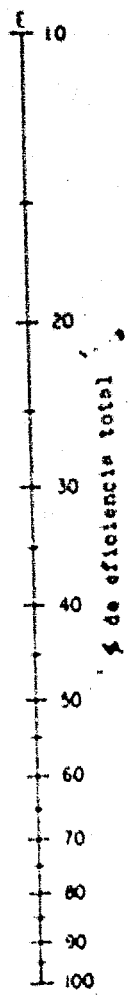
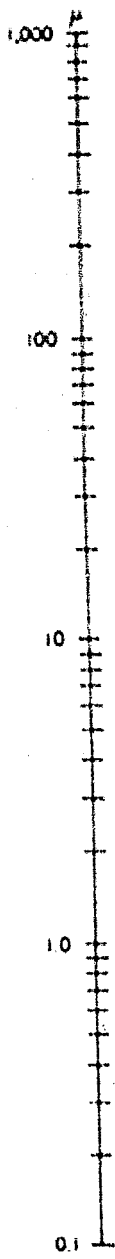
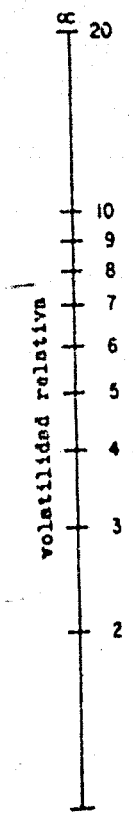


FIGURA 35



**2.4.D. - ALTURA DE SELLO**

## 2.4.D.a. - ALTURA DEL LIQUIDO SOBRE EL VERTEDERO PARA PLATOS PERFORADOS. -

BASE: Ecuación de Francis:

$$h_{ow} = \left( \frac{Q}{2.98 L_w} \right)^{2/3}$$

NOMENCLATURA:

$h_{ow}$  = altura del líquido sobre el vertedero, in.

$Q$  = flujo de líquido, en g. p. m.

$L_w$  = longitud del vertedero.

OBSERVACIONES:

Esta fórmula ha sido extensiva para calcular la altura del líquido sobre el vertedero rectangular, el efecto de la curvatura de la columna no afecta cuando la relación de la longitud del vertedero y el diámetro del plato es grande.

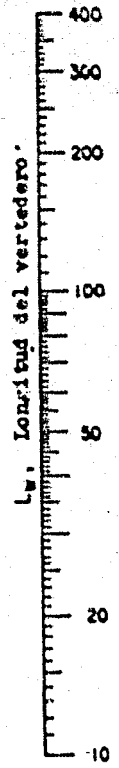
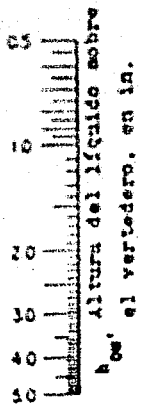
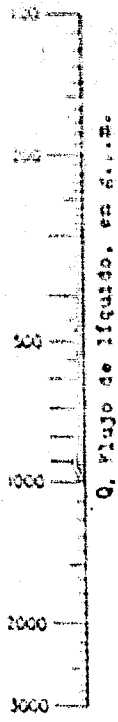
Las alturas del líquido sobre el vertedero a cargas máximas y mínimas deben estar entre los límites:

$$0.5 < h_{ow} < 4.0 - h_w$$

MANERA DE USARSE:

1. - Unir el dato del flujo de líquido, con el dato de la longitud del vertedero, cruzando así la altura del líquido sobre el vertedero.

EJEMPLO: Para un flujo de líquido de 1000 g. p. m. y para una longitud de vertedero de 100 in. encontrar la altura del líquido sobre el vertedero. Haciendo simplemente la indicación anterior encontramos que  $h_{ow} = 2.18$



Relación de Francis

$$h_{ow} = \left[ \frac{Q}{2.98 L_w} \right]^{2/3}$$

FIGURA 16



## 2.4.D.b. - ALTURA DEL SELLO DEL LIQUIDO PARA UNA TORRE DE MAMPARAS PERFORADAS. -

BASE:

$$H_s = \frac{t \cdot Q_w}{(7.47) \frac{\pi}{4} D_t^2}$$

NOMENCLATURA:

- $H_s$  = longitud o dimensión del dique requerido para la capacidad del sello, en ft.
- $t$  = tiempo de residencia del líquido, en min.
- $D_t$  = diámetro de la torre, en ft.
- $Q_w$  = velocidad a la cual, el líquido es apartado de la torre, en g. p. m. calientes.

OBSERVACIONES:

1. - La capacidad del líquido de sello es usualmente suministrada en el fondo de la torre.
2. - Esta capacidad está basada en el tiempo de residencia -- del líquido de 2 a 10 min.

MANERA DE USARSE:

1. - Entre el nomograma por su parte izquierda, con el diámetro de la torre.
2. - Trace una línea del diámetro, atravesando el gasto de líquido, extendiéndola hasta que corte la línea índice.
3. - Del tiempo de residencia de diseño, trace una línea que pase por la intersección de la línea índice, extendiéndola hasta la escala de la altura del sello. Lea aquí la altura

de sello requerida.

**EJEMPLO:**

100 g. p. m. son desalojados de una torre de mamparas perforadas, cuyo diámetro es de 7 ft. ¿Cuál será la altura del sello del líquido para un tiempo de residencia de 4 minutos?

**RESPUESTA:** 4 ft 2 in.

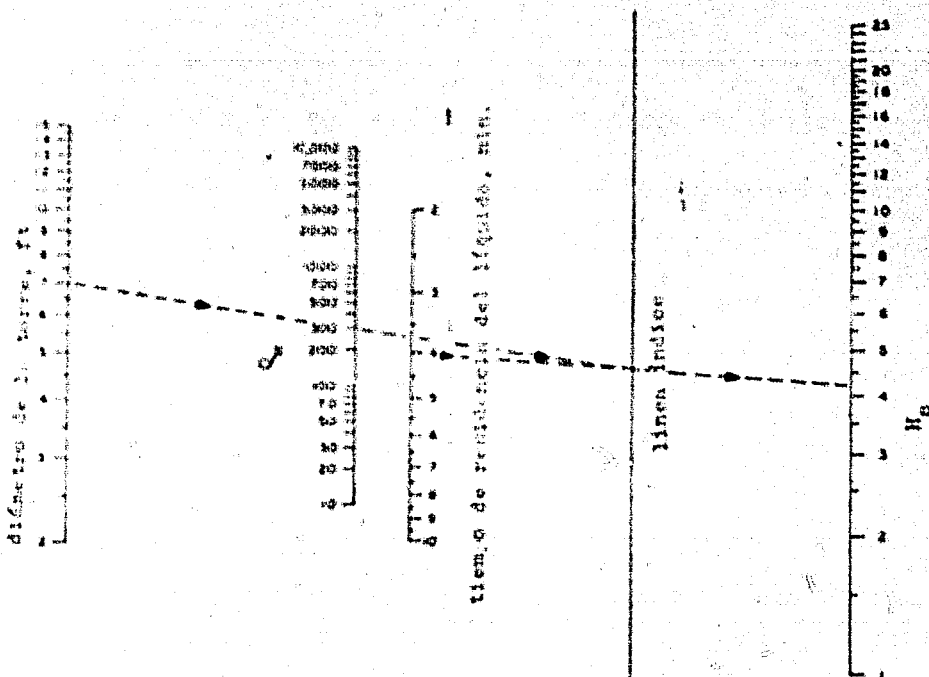


FIGURA 37

## 2.4.E. - DISTANCIA ENTRE PLATOS

2.4. E. a. - DISTANCIA MINIMA ENTRE PLATOS CUANDO LA ENTRA-  
DA DE LIQUIDO ES LIMITANTE, PARA PLATOS DE FLUJO  
CRUZADO CON BAJA AREA PERFORADA (RISER AREA).

BASE:

$$h_{ow} = 10 F (L/W)^{2/3}$$

$$F = (W/W_1)^{2/3}$$

$$h_d = 0.6 (u_d)^2$$

$$h_{re} = (u_r)^2 \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)$$

NOMENCLATURA:

- $h_{ow}$  = altura del líquido sobre el vertedero, en in.
- $F$  = factor de corrección (ver apéndice).
- $L$  = carga líquida, en  $ft^3/seg.$
- $W$  = longitud del vertedero actual, en in.
- $W_1$  = longitud efectiva del vertedero, en in.
- $h_d$  = cabeza de fricción debido al flujo del líquido, en in. de líquido. (under downspouts).
- $U_d$  = velocidad del líquido (under downspout) en  $ft/seg.$
- $h_{re}$  = cabeza de fricción debido al flujo de vapor a través de perforaciones y cachuchas, en in de líquido.
- $U_r$  = velocidad del vapor a través de las perforaciones, en  $ft/seg.$
- $\rho_l$  = densidad del líquido, en  $lb/ft^3$
- $\rho_v$  = densidad del vapor, en  $lb/ft^3$

S = distancia entre plato y plato en in. (de centro a centro).

H = altura del líquido en el "downspouts"

### OBSERVACIONES:

1. Este método está basado en el hecho de que  $S_{\min} = 2H$
2. H está definido como:  $2(h_w + h_{ow}) + h_d + h_{re}$
3.  $p' = \left[ \text{carga de vapor (lb) / carga de líquido (lb)} \right]^2 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)$

### MANERA DE USARSE:

1. Se une por medio de una línea recta la escala que indica la carga líquida con el diámetro de la torre pudiendo leer los valores:

$$h_{ow}/F \cdot h_d \cdot h_{re}/p' \cdot F$$

2. Se hacen las sustituciones adecuadas para encontrar el valor de  $S_{\min}$

### PROBLEMA:

Encontrar la distancia mínima entre platos, cuando la carga líquida es limitante para platos de flujo cruzado con baja área perforada. La carga líquida es de 19,500 galones por hora, el diámetro de la torre es de 4.95 ft y su  $h_w$  es de 2.5 in; sabiendo que el valor de  $p'$  es de 20.2

HACIENDO LAS INDICACIONES ANTERIORES, encontramos:

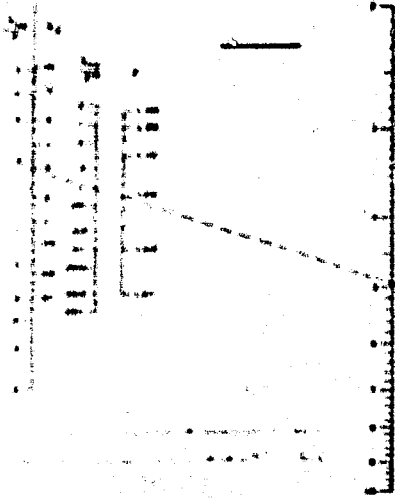
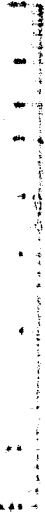
$$h_{ow}/F = 1.85 \quad h_d = 0.46 \quad h_{re}/p' = 0.075 \quad F = 1.05$$

por lo tanto:

$$S_{min} = 2 \left[ 2(2.5 + 1.85 (1.05) + 0.46 + 0.095(20.2) \right]$$

$$S_{min} = 22.52$$

carga líquida, miles de galones/hr



diámetro de la torre, in

Figura 38

2.4.E.6. DISTANCIA MINIMA ENTRE PLATOS, CUANDO LA ENTRADA DE LIQUIDO ES LIMITANTE, PARA PLATOS DE FLUJO CRUZADO, CON MEDIA AREA PERFORADA (RISER - AREA).

$$\text{BASE: } h_{\text{ovm}} = 10 F (L/W)^{2/3}$$

$$F = (W/W_1)^{2/3}$$

$$h_d = 0.4 (u_d)^2$$

$$h_{re} = (u_r)^2 (1 - \frac{u_r}{u_d})$$

NOMENCLATURA:

$h_{\text{ovm}}$  \* altura del líquido sobre el vertedero, en in.

$F$  \* factor de corrección, (ver el apéndice)

$L$  \* carga líquida, en  $\text{ft}^3/\text{seg}$ .

$W$  \* longitud actual del vertedero en in.

$W_1$  \* longitud efectiva del vertedero, en in.

$h_d$  \* cabeza de fricción debido al flujo del líquido en in. de líquido (under downspout)

$u_d$  \* velocidad del líquido, en  $\text{ft}/\text{seg}$  (under downspout)

$h_{re}$  \* cabeza de fricción debido al flujo de vapor a través de perforaciones y de las cachuchas, en in de líquido.

$u_r$  \* velocidad del vapor a través de las perforaciones, en  $\text{ft}/\text{seg}$ .

$o$  \*  $l$  \* densidad del líquido, en  $\text{lb}/\text{ft}^3$



2.4. E. b. - DISTANCIA MINIMA ENTRE PLATOS, CUANDO LA ENTRA DA DE LIQUIDO ES LIMITANTE. PARA PLATOS DE FLU-- JO CRUZADO. CON MEDIA AREA PERFORADA (RISER -- AREA).

$$\begin{aligned} \text{BASE: } h_{ow} &= 10 F (L/W)^{2/3} \\ F &= (W/W_1)^{2/3} \\ h_d &= 0.6 (u_d)^2 \\ h_{re} &= (u_r)^2 \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \end{aligned}$$

NOMENCLATURA:

- $h_{ow}$  : altura del líquido sobre el vertedero, en in.
- $F$  : factor de corrección. (ver el apéndice)
- $L$  : carga líquida, en  $\text{ft}^3/\text{seg}$ .
- $W$  : longitud actual del vertedero en in.
- $W_1$  : longitud efectiva del vertedero, en in.
- $h_d$  : cabeza de fricción debido al flujo del líquido en in. de líquido (under downspout)
- $u_d$  : velocidad del líquido, en  $\text{ft}/\text{seg}$  (under downspout)
- $h_{re}$  : cabeza de fricción debido al flujo de vapor a través de perforaciones y de las cachuchas, en in de líquido.
- $u_r$  : velocidad del vapor a través de las perforaciones, en  $\text{ft}/\text{seg}$ .
- $\rho_l$  : densidad del líquido, en  $\text{lb}/\text{ft}^3$

- $\rho_v$  \* densidad del vapor, en lb/ft<sup>3</sup>.
- S \* distancia entre platos (de centro a centro) en in.
- H \* altura del líquido en el "downspouts" en in.

**OBSERVACIONES:**

- 1.- Este método está basado en el hecho de que:

$$S_{min} = 2 H$$

- 2.- H está definido como  $2 (h_w + h_{ow}) + h_d + h_{re}$

- 3.-  $p = \left[ \text{carga de vapor (lb)} / \text{carga de líquido (lb)} \right]^2 (\rho_l / \rho_v)$

**MANERA DE USARSE:**

- 1.- Se une por medio de una línea recta la escala que indica la carga líquida con el diámetro de la torre pudiendo así leer los valores:

$$h_{ow} / F = h_d + h_{re} / \frac{p}{F}$$

- 2.- Se hacen las sustituciones adecuadas para encontrar el -- valor de  $S_{min}$

**EJEMPLO:**

Encontrar la distancia mínima entre platos, cuando la carga líquida es limitante, para platos de flujo cruzado con media área perforada. La carga líquida es de 19,500 gal por hora, el diámetro de la torre es de 4.95 ft y su  $h_w$  es de 2.5 in. sabiendo que el valor de  $p$  es de 20.0

Llevando a cabo las indicaciones anteriores encontramos:

$$h_{ow}/F = 1.71 \quad h_d = 0.38, \quad h_{re}/p' = 0.14 \quad F = 1.028$$

por lo mismo tenemos:

$$S_{min} = 2 \left[ 2(2.5 + 1.71(1.028) ( + 0.38 + 0.14(20.2) \right]$$

$$S_{min} = 23.42$$

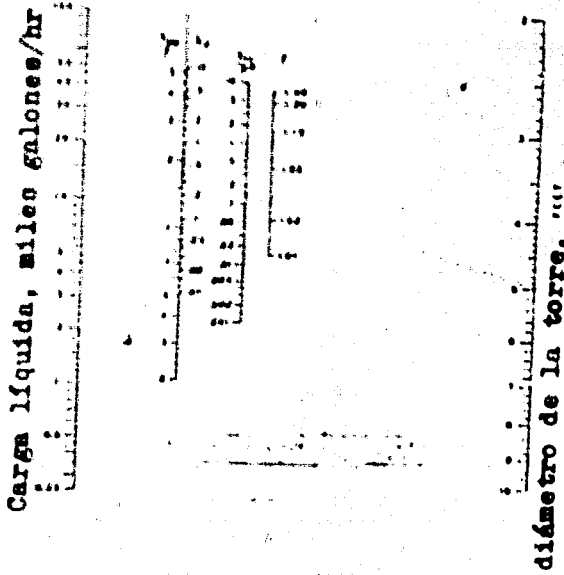


Figura 39

2.4.E.c. - DISTANCIA MINIMA ENTRE PLATOS, CUANDO LA ENTRA  
DA DE LIQUIDO ES LIMITANTE, PARA PLATOS DE FLU--  
JO CRUZADO, CON ALTA AREA PERFORADA, (RISER --  
AREA).

BASE:

$$h_{ow} = 10 F (L/W)^{2/3}$$

$$F = (W/W_1)^{2/3}$$

$$h_d = 0.6 (u_d)^2$$

$$h_{re} = (u_r)^2 (\rho_v / \rho_l)$$

NOMENCLATURA:

- $h_{ow}$  \* altura del líquido sobre el vertedero, en in.
- $F$  \* factor de corrección (ver apéndice).
- $L$  \* carga líquida, en  $ft^3/seg.$
- $W$  \* longitud del vertedero actual, en in.
- $W_1$  \* longitud efectiva del vertedero, en in.
- $h_d$  \* cabeza de fricción debido al flujo del líquido, en in.  
de líquido. (under downspout).
- $u_d$  \* velocidad del líquido (under downspout) en  $ft/seg.$
- $h_{re}$  \* cabeza de fricción debido al flujo de vapor a través  
de las perforaciones ó de las cachuchas, en in. de -  
líquido.
- $u_r$  \* velocidad del vapor a través de las perforaciones, en  
 $ft/seg.$
- $\rho_l$  \* densidad del líquido, en  $lb/ft^3$

- $\rho_v$  = densidad del vapor, en lb/ft<sup>3</sup>
- S = distancia entre plato y plato, en in. (de centro a centro).
- H = altura del líquido en el "downspouts".

#### OBSERVACIONES:

- 1.- Este método está basado en el hecho de que  $S_{min} = 2H$
- 2.- H está definido como:  $2(h_w + h_{ow}) + h_d + h_{re}$
- 3.-  $p' = \left[ \frac{\text{carga de vapor (lb)} / \text{carga de líquido (lb)}}{(\rho_l / \rho_v)} \right]^2$

#### MANERA DE USARSE:

- 1.- Se une por medio de una línea recta la escala que indica la carga líquida con el diámetro de la torre pudiendo leer los valores:

$$h_{ow}/F \cdot h_d \cdot h_{re}/p' \cdot F$$

- 2.- Se hacen las sustituciones adecuadas para encontrar el valor de  $S_{min}$ .

#### EJEMPLO:

Encontrar la distancia mínima entre platos, cuando la entrada de líquido es limitante, para platos de flujo cruzado con alta área perforada. La carga líquida es de 21,000 galones por hora, el diámetro de la torre es de 5.1 ft y su  $h_w$  es de 2.5 in, sabiendo que el valor de  $p'$  es de 20.2

Haciendo las indicaciones anteriores, encontramos que:

$$h_{ow} / F = 2.1$$

$$h_d = 0.57$$

$$h_{re}/p' = 0.065$$

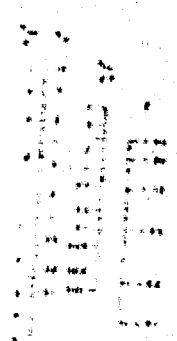
$$F = 1.1$$

Por lo tanto:

$$S_{min} = 2.2 \left[ (2.5 + 2.1(1.1) + 0.57 + 0.065(20.2)) \right]$$

$$S_{min} = 23$$

Carga líquida, miles de galones/hr



diámetro de la torre, ft

Figura 40

**2.4.E.d. - DISTANCIA MINIMA ENTRE PLATOS, CUANDO LA ENTRADA DE LIQUIDO ES LIMITANTE PARA PLATOS DE DOBLE PASO.**

**BASE:**

$$h_{\text{ow}} = 10 F (L/W)^{2/3}$$

$$F = (W/W_1)^{2/3}$$

$$h_f = 0.6 (w_f)^2$$

$$h_{re} = (u_r)^2 \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)$$

**NOMENCLATURA:**

- $h_{\text{ow}}$  = altura del líquido sobre el vertedero, en in.
- $F$  = factor de corrección (ver apéndice).
- $L$  = carga líquida en  $\text{ft}^3/\text{seg}$ .
- $W$  = longitud del vertedero actual, en in.
- $W_1$  = longitud efectiva del vertedero, en in.
- $h_f$  = cabeza de fricción debido al flujo del líquido, en in. de líquido. (under downspout).
- $u_d$  = velocidad del líquido (under downspout) en  $\text{ft}/\text{seg}$ .
- $h_{re}$  = cabeza de fricción debido al flujo de vapor a través de las perforaciones o de las cachucas, en in. de líquido.
- $u_r$  = velocidad del vapor a través de las perforaciones, en  $\text{ft}/\text{seg}$ .
- $\rho_l$  = densidad del líquido, en  $\text{lb}/\text{ft}^3$
- $\rho_v$  = densidad del vapor, en  $\text{lb}/\text{ft}^3$

- S = distancia entre plato y plato, en in. (de centro a -- centro).
- H = altura del líquido en el downspout.

#### OBSERVACIONES:

- 1.- Este método está basado en el hecho de que  $S_{\min} = 2 H$
- 2.- H está definido como:  $2 (h_w + h_{ow}) + h_d + h_{re}$
- 3.-  $p' = \left[ \text{carga de vapor (lb)} / \text{carga de líquido (lb)} \right]^2 (\rho_l / \rho_v)$

#### MANERA DE USARSE:

- 1.- Se une por medio de una línea recta la escala que indica la carga líquida con el diámetro de la torre pudiendo -- leer los valores:

$$h_{ow}/F \cdot h_d \cdot h_{re}/p' \cdot F$$

- 2.- Se hacen las sustituciones adecuadas para encontrar el -- valor de  $S_{\min}$ .

#### EJEMPLO:

Encuentrar la distancia mínima entre platos, cuando la entrada de líquido es limitante, para platos de doble paso.

La carga líquida es de 200,000 galones por hora, el diámetro de la torre es de 9.9 ft y su  $h_w$  es de 2.5 in; sabiendo que el valor de  $p'$  es de 20.2

Haciendo las indicaciones anteriores, encontramos que:



$$h_{ow}/F = 3.4$$

$$h_d = 2.7$$

$$h_{re}/p' = 0.9$$

$$F = 1.017$$

Por lo tanto tenemos:

$$S_{min} = 2 \left[ 2 (2.5 + 3.4 (1.017) + 2.7 + 0.9 (20.2) \right]$$

$$S_{min} = 65.6$$

Carga líquida, miles de galones/hr



Díametro de la torre, ft

Figura 41

## 2.4.E.e. DISTANCIA ENTRE MAMPARAS.

BASE:

$$\frac{ACFS}{A_c} = \frac{K_1}{8680} \left( \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$A_c = l_D \left( \frac{T \cdot h_D \cdot d_B}{12} \right)^v$$

NOMENCLATURA:

- $A_c$  \* área de la cortina del líquido, en  $ft^2$
- $K_1$  \* constante, cuyos valores han sido determinados experimentalmente y que se pueden encontrar en la literatura.
- $\rho_l$  \* densidad del líquido, en  $lb/ft^3$
- $\rho_v$  \* densidad del vapor, en  $lb/ft^3$
- ACFS \* flujo de vapor a través de la mampara, en  $ft^3/seg.$
- $l_D$  \* longitud del estancamiento (longitud total de todos -- los estancamientos en una mampara), en ft.
- T \* distancia entre mamparas, en in.
- $h_D$  \* altura del dique, (generalmente 4 ó 6 pulgadas)
- $d_B$  \* profundidad de la mampara, (soporte perpendicular a la dirección del flujo de vapor), en in.

OBSERVACIONES

- 1. Davies y Gordon, indican que un valor de 10,000 para --
- $K_1$  ha sido usado para determinar la velocidad en el ---

área de la cortina. Otros valores para  $K_1$  basados en su experiencia o en datos, pueden ser usados.

- 2.- El límite superior de  $K_1$  será seleccionada para restringir la entrada del líquido a un valor razonable.

#### MANERA DE USARSE:

- 1.- Entre al nomograma del lado derecho, con  $K_1$
- 2.- Dibuje una línea de  $K_1$  a través de la línea índice de vapor (valor encontrado en el otro nomograma), extienda - esta línea hasta que corte con la escala  $A_c$ .  
Esta es el área de la cortina requerida.
- 3.- Vuelva a entrar al nomograma del lado izquierdo con el % de área abierta.
- 4.- Dibuje una línea uniendo el % de área abierta con el diámetro de la torre; esta línea cruza la escala  $l_D$ .
- 5.- Una línea dibujada desde la escala  $l_D$  a través del valor del área de la cortina, e interceptará con la escala de -- abertura de la mampara, es decir es el valor de  $(T - h_D - d_B)$ ; de donde se puede obtener el valor de T.

#### EJEMPLO:

Una torre tiene 5 mamparas de flujo simple, con un espaciamiento de 24 in. cada una, tiene una altura de sello de 4 in. y una profundidad perpendicular al flujo de vapor de 3 in. Encontrar el valor de  $K_1$ .

Resolviendo este problema, siguiendo las indicaciones anterior-

rea, pero a la inversa, encontramos que el valor de  $K_1$  es de 6000, el cual está dentro de lo correcto.

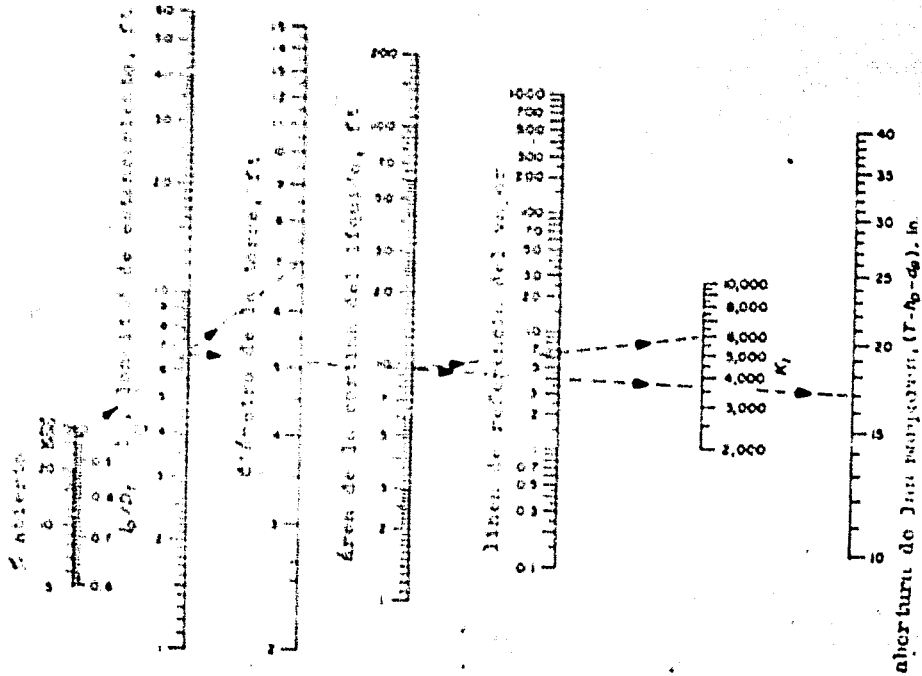


Figura 42

**2.4.F. ALIMENTACION.**

## 2.4.F.A. - ALIMENTACION PARA UNA TORRE DE PLATOS PERFORADOS.

BASE:

$$e = 0.22 \left( \frac{\gamma_l}{\rho} \right) \left( \frac{u_c}{S_e} \right)^{2.2}$$

NOMENCLATURA:

- $e$  = relación de alimentación: lb de líquido / lb/ de vapor.
- $\gamma_l$  = tensión superficial del líquido, en dinas/cm.
- $u_c$  = velocidad de la columna de vapor, en ft/seg.
- $S_e$  = distancia efectiva entre platos, en in.
- $S$  = distancia entre platos, en in.
- $h_l$  = altura del líquido puro sobre el plato, en in.

OBSERVACIONES:

1. - El espaciamiento efectivo entre platos está definido como la distancia entre la superficie de la espuma y el plato superior.
2. - Asumiendo que el promedio de la densidad del líquido en el plato es 0.4 veces la densidad del líquido claro, el espaciamiento efectivo entre platos es realmente calculado por:  $S_e = S - 2.5 h_l$

MODO DE USARSE:

1. - Con la tensión superficial y la velocidad del vapor en la columna, se traza en el nomograma una línea recta, haciéndola cruzar la línea de referencia.

2.- Con el punto de la línea de referencia y la distancia efectiva entre platos, trazamos otra recta, cruzando así la -- escala de la relación de alimentación.

#### EJEMPLO.

Encontrar la relación de alimentación óptima, para una torre -- de platos perforados, con los siguientes datos:

$$\rho = 6.8 \text{ dinas/cm} \quad u_c = 0.8 \text{ ft/seg} \quad S_e = 20 \text{ in.}$$

Haciendo las indicaciones anteriores, encontramos que:

$$e = 0.00085$$

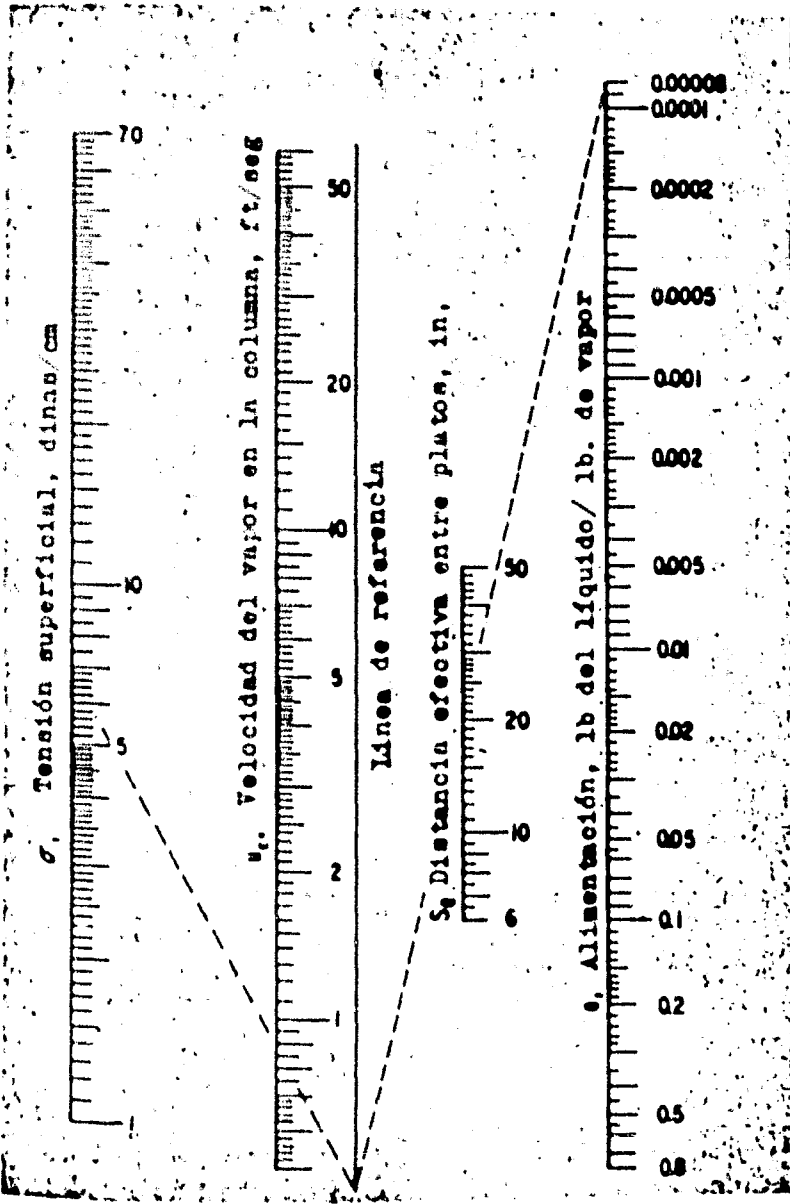


FIGURA 43



2.4.G. - DIAMETRO DE TORRE.

## 2.4. G. \* - DIAMETRO DE LA COLUMNA.

BASE:

$$D' = \left[ \frac{4V}{r c'} \sqrt{\frac{1}{d_l / d_v - 1}} \right]^{1/2}$$

NOMENCLATURA:

- $D'$  \* diámetro de la columna, en ft.
- $V$  \* carga total de vapor, en ft<sup>3</sup>/seg.
- $r$  \* 1.1416
- $c'$  \* constante de la distancia entre platos.
- $d_l$  \* densidad del líquido, en lb/ft<sup>3</sup>
- $d_v$  \* densidad del vapor, en lb/ft<sup>3</sup>

OBSERVACIONES:

1. - La alimentación debe estar en su punto de burbuja.
2. - Las velocidades molales de flujo de vapor y líquido son esencialmente constante.
3. - El método predice la separación entre 2 componentes en un sistema multicomponente.
4. - Está basada en la alimentación como condición limitante.
5. - El espaciamiento entre platos aproximado usado se obtiene:

| <u>D (ft)</u> | <u>dist. entre platos (in)</u> |
|---------------|--------------------------------|
| 4             | 16                             |
| 4             | 24                             |

6. - La constante  $c'$  se puede obtener de:

| Dist. entre platos (in) | $c'$  |
|-------------------------|-------|
| 12                      | 0.075 |
| 18                      | 0.14  |
| 24                      | 0.176 |

#### MODO DE USARSE:

1. - Se une el valor de  $c'$  (1) con el valor de  $v$  (2), llevando la línea hasta cruzar la escala (3).
2. - El punto obtenido en la escala (3), se une con el valor de  $V$  escala (5), cruzando la escala (4), la cual nos da el dí metro interno de la columna.

#### EJEMPLO

Determine el diámetro y la altura de la columna requerida para la siguiente separación:

|       | Alimentación |       | Destilado |       | Residuo |        |
|-------|--------------|-------|-----------|-------|---------|--------|
|       | moles        | $x_f$ | moles     | $y_D$ | moles   | $x_b$  |
| $C_2$ | 25           | 0.25  | 25        | 0.417 | 0.0     | 0.000  |
| $C_3$ | 15           | 0.15  | 14.5      | 0.575 | 0.5     | 0.0125 |
| $C_4$ | 20           | 0.20  | 0.5       | 0.008 | 19.5    | 0.4875 |
| $C_5$ | 20           | 0.20  | 0.0       | 0.000 | 20.0    | 0.5000 |
|       | 100          | 1.00  | 60.0      | 1.000 | 40.0    | 1.0000 |

La columna opera a 100 psia. Emplea un condensador parcial con el destilado removido como vapor. Ya que la separación -

eféctica es entre  $C_3$  y  $C_4$ .  $C_3$  es supuesto el componente ligero y  $C_4$  el pesado.

Del cálculo del punto de rocío,  $\alpha$  para la corriente de vapor que abandona la columna por la parte superior es 2.7 y el cálculo del punto de burbuja en los fondos da  $\alpha = 2.0$ . La  $\alpha$  promedio que se utiliza es de 2.12 (obtenida de un nomograma anterior). La viscosidad de alimentación es 0.15 cp. La densidad del líquido es de 25 lb/ft<sup>3</sup> y la del vapor es de 1.94 lb/ft<sup>3</sup>. El peso molecular promedio del vapor es de 40.

Usando las fracciones mol de los componentes ligero y pesado en el destilado y en el residuo, conforme a otro nomograma anterior. Se viene a ser 9.5. Para este sistema  $N_m = 7.5$  de aquí que  $N_2 = 15.0$ .

Del nomograma de la pág. 76  $R_m = 2.16$ ; suponiendo que la relación de reflujo actual sea de 35% mayor,  $R = 2.92$ .

Sólo se requieren 13 platos, como se ha determinado con los cálculos plato a plato a esta relación de reflujo.

La eficiencia total de plato es hallada por el nomograma 35 de la página 76 usando una volatilidad relativa de 2.12 y una viscosidad de 0.25 cp., es de 70.7%, por lo tanto se requieren aproximadamente 21 platos reales para esta separación.

El diámetro de la columna es determinado por este nomograma. Antes de esto se debe encontrar la carga de vapor a la columna.

$$v = \frac{60 (2.92 + 1) 40}{3600 (1.94)} = 1.35 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

Ya que la carga de vapor es baja y la presión de operación es alta, suponemos una distancia entre plato de 18 in.

Por lo tanto, obtenemos de este nomograma que el diámetro de la columna es de 1.67 ft. o aproximadamente 2 ft.

Suponiendo que el colector de la columna tiene una altura de 8 ft. una parte de espacio libre superior de 2ft y una distancia adicional de 1.5 ft. para una abertura de inspección en la mitad de la sección, la altura puede ser determinada del número de platos y la distancia entre plato y plato.

La altura de la columna es:

$$8' + 2' + 1.5' + (1.5' \times 21) = 43'$$

ESTACIONAMENTO DE LA PLANTA

ESTACIONAMENTO DE LA PLANTA

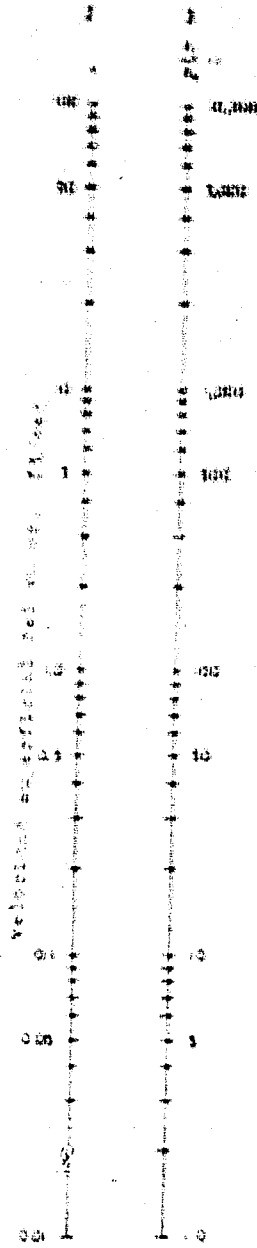


FIGURA 4

1  
2  
3  
4

diámetro interno de la columna (mm)



## 2.4. G. 5. ESTIMACION DE TORRES DE DESTILACION. (DIAMETRO)

**BASE:** Se basa en el cálculo del diámetro de la torre, basado en la velocidad superficial del vapor.

$$d = 0.719 \sqrt{\frac{W (T + 460)}{M_w V (P + 14.7)}}$$

### NOMENCLATURA

- d = diámetro interno de la columna, en pulgadas.
- W = flujo de gas, en lb./hr.
- M<sub>w</sub> = peso molecular del gas a destilado.
- V = velocidad superficial del gas, en ft./seg.
- Q = flujo volumétrico del gas, en ft<sup>3</sup>/min.
- P = presión del gas, en psig.
- T = temperatura del gas °F.

### OBSERVACIONES:

Está basado en el flujo total de gas; este tipo de procedimiento es usado en la calibración de columnas rugosas y donde las características del plato o del empaque son bien conocidas. La ecuación está deducida de las siguientes ecuaciones:

$$d = 1.75 \sqrt{Q/V}$$

$$Q = \frac{359}{60} \times \frac{W}{M_w} \times \frac{T + 460}{492} \times V$$

$$\frac{14.7}{P + 14.7} = 0.1758 \left[ \frac{W}{M_w} \times \frac{T + 460}{P + 14.7} \right]$$

## MODO DE USARSE:

1. - Se traza una línea que una los datos correspondientes de  $W$  y  $M_w$ , continuando la línea hasta la escala pivote  $\alpha$ .
2. - Se une el punto  $\alpha$  con el dato de la  $T$ , siguiendo la línea hasta la escala  $\beta$ .
3. - Con el punto de la escala  $\beta$  y el punto correspondiente a la presión en la escala  $P$ , se traza una línea hasta llegar a la escala  $O$ .
4. - Este punto de la escala  $O$  se une con el punto indicado en la escala  $V$ , siguiéndose hasta la escala  $d$ , leyéndose ahí la respuesta.

Para determinar  $W$ , se sigue el mismo procedimiento, sólo -- que a la inversa.

Para cuando no se conoce  $V$ , se puede estimar según:

Para columnas empacadas de 2 - 6 ft/seg.

Para columnas de platos de 5 - 12 ft/seg.

Para columnas al vacío, las velocidades altas son permicibles.

## EJEMPLO:

Se desea destilar 500 lb/hr. de benceno, con una relación de reflujo de 1:1. ¿Qué diámetro de la columna es requerido, si la presión es de 2 psig, usando una torre empacada.



$W = 4 \times 500 = 2,000$  lb/hr. de benceno

$M_w = 78$

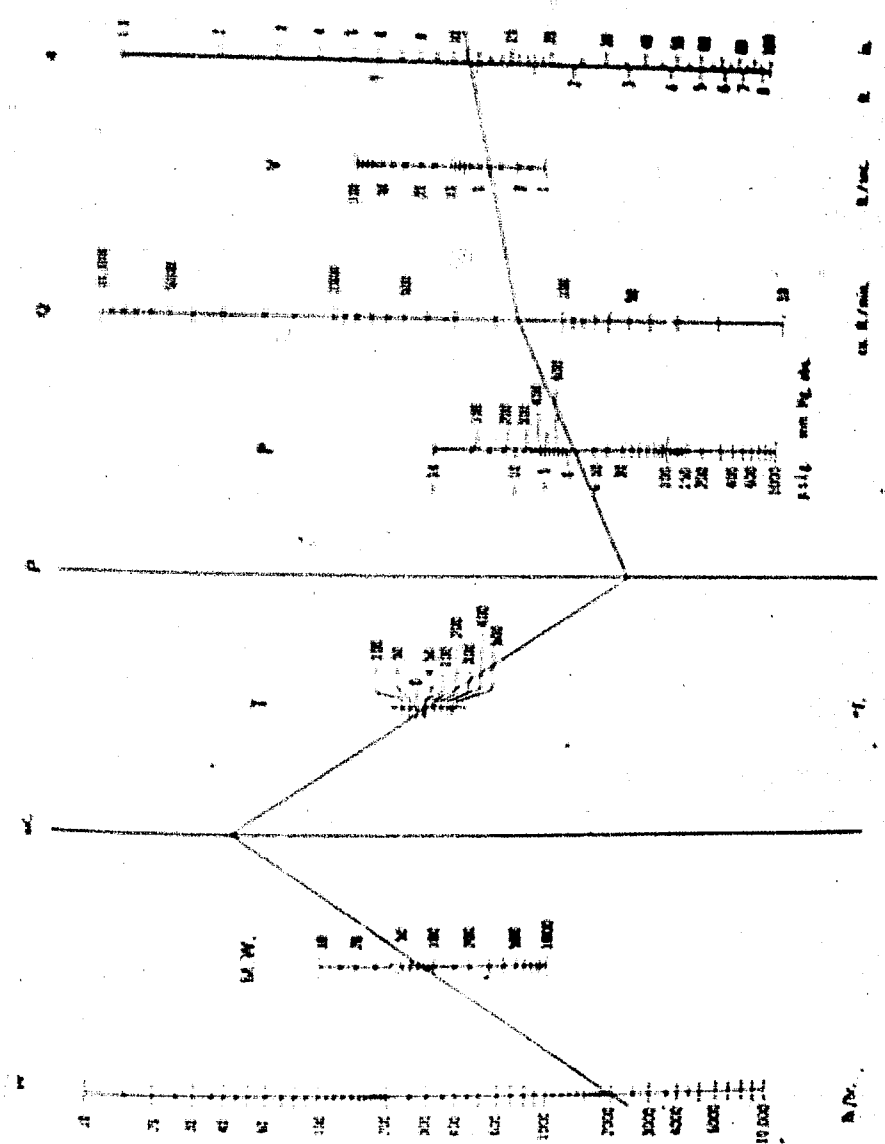
$T = 176$  °F

$P = 2$  psig.

$V = 4$  ft/seg.

Seguiente las indicaciones anteriores, llegamos a la conclusión de que el diámetro requerido es de 11.5 in.

Como en el comercio no hay este diámetro, el diámetro superior es de 12 in. escogiendo éste para la torre.



SECTION A-A

Fig. 1

2.4.G.c. - DIAMETRO MÍNIMO DE LA TORRE, CUANDO LA ALIMENTACION ES LIMITANTE.

BASE:

$$(D_{\min})^2 = \frac{4}{\pi} \frac{V_w}{C \sqrt{\rho_v (\rho_l - \rho_v)}}$$

COMENCLATURA

- $D_{\min}$  • diámetro mínimo de la torre, en ft.
- $V_w$  • carga de vapor, en lb/hr.
- $C$  • constante de Souders & Brown.
- $\rho_v$  • densidad del vapor, en lb/ft<sup>3</sup>.
- $\rho_l$  • densidad del líquido, en lb/ft<sup>3</sup>.
- $G$  • masa velocidad del vapor, en lb/hr. ft<sup>2</sup>.

OBSERVACIONES

- 1.-  $C = G_{\max} / \sqrt{\rho_v (\rho_l - \rho_v)}$
- 2.- Al diámetro obtenido se le ha de agregar un factor de seguridad, el recomendable es el 25%, basado en la velocidad del vapor usada, que esto corresponde aproximadamente a un 12% basado en el diámetro de la torre.

MANERA DE USARSE:

- 1.- Entramos a la gráfica con el espaciamiento entre platos.
- 2.- Con una línea vertical llegamos hasta las gráficas de la tensión superficial del líquido; y de aquí encontramos el valor de C.
- 3.- Unimos el valor de C con el valor de la relación:

$\sqrt{\rho_v (\rho_l - \rho_v)}$ : cruzando así la línea de referencia.

- 4.- Con el punto en la línea de referencia, y la velocidad del vapor, trazamos otra línea, continuándola hasta leer el diámetro mínimo de la torre.

**EJEMPLO:**

Encontrar el diámetro mínimo de la torre, cuya distancia entre platos es de 19 in., la tensión superficial del líquido es de 6.5 dinas/cm, un régimen de vapor de 40,000 libras/hr. y una relación de  $\sqrt{\rho_v (\rho_l - \rho_v)} = 5 \text{ lb/ft}^3$ .

Haciendo las indicaciones anteriores encontramos que el diámetro mínimo de la torre es de 4.67 ft. a esto hay que aumentarle todavía el porcentaje de seguridad.

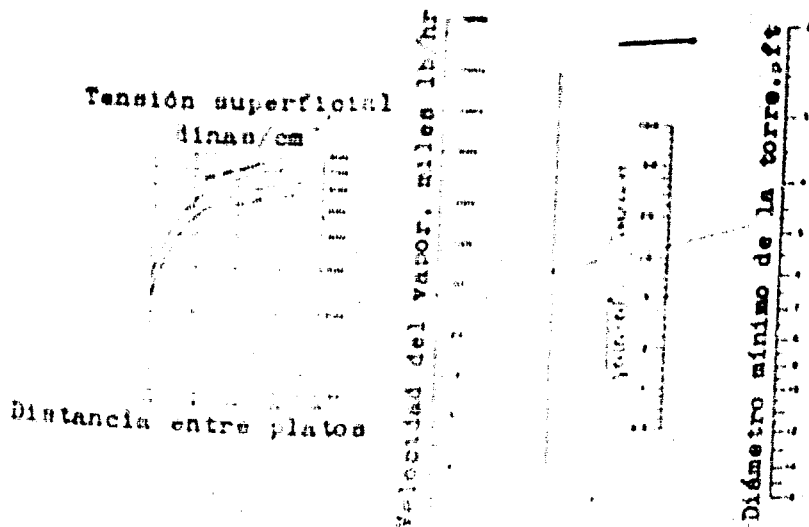


Figura 4b

## 2.4.6.4. DIAMETRO DE UNA TORRE DE MAMPARAS PERFORADAS.

BASE: Empírica.

$$D_t = \sqrt{\frac{400 A_o}{\% \text{ abierto}}}$$

$$\frac{ACFS}{A_o} = \frac{K}{4680} \left[ \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right]^{1/2}$$

### NOMENCLATURA:

- $D_t$  = diámetro de la torre, en ft.
- $A_o$  = área abierta al flujo de vapor, en  $ft^2$
- ACFS = flujo real de vapor a través de la mampara, en  $ft^3/seg.$
- K = constante, cuyo valor ha sido determinado experimentalmente, y se haya reportado en la literatura.
- $\rho_L$  = densidad del líquido, a las condiciones de flujo, en  $lb/ft^3$ .
- $\rho_v$  = densidad de vapor, a las condiciones de flujo, en  $lb/ft^3$ .

### OBSERVACIONES:

1. - El área abierta es siempre menos del 50% del área de la torre y mayor del 25%, para garantizar que el líquido que cae, pegue directamente en la mampara de abajo.

### MODO DE USARSE:

1. - Entre en el nomograma del lado izquierdo con el valor de  $\rho_v$
2. - Una la densidad del vapor con la del líquido, marcando la -

intersección con la línea índice A.

- 3.- De la marca encontrada, trace una línea hasta la escala -- ACFS. Marque la intersección con la línea índice de vapor, para usarlo cuando quiera encontrar el espaciamiento entre las manparas.
- 4.- Usando la K de diseño, dibuje una línea de este punto y pasando por el valor de la línea índice del vapor, extendiéndola hasta cortar la línea índice B.
- 5.- Una la marca de la línea índice B con el porcentaje de -- área abierta. Lea el diámetro de la torre. (aumente el diámetro lo más cerca de algún tamaño comercial).

#### EJEMPLO

Encontrar el diámetro de una torre de manparas perforadas -- teniendo 32% de área abierta; use  $K = 3000$ ;  $ACFS = 60.2$ .

$$P_1 = 30 \text{ lb/ft}^2, \quad P_2 = 0.16 \text{ lb/ft}^2.$$

Haciendo las pasas que anteriormente indicamos, encontramos un diámetro para la torre de 7 ft.

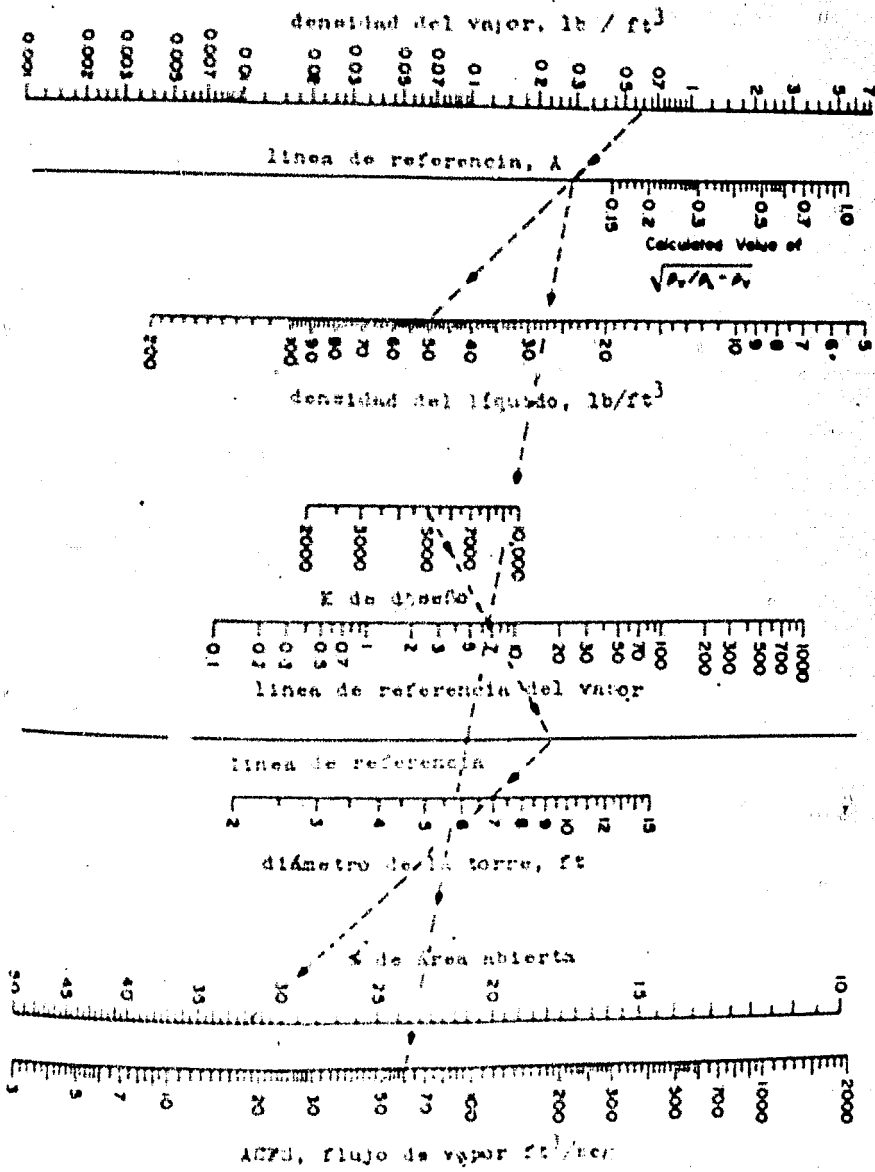


FIGURA 47

2.4.H. - AREA PERFORADA.



## 2.4.H.a. - AREA PERFORADA EN LAS MAMPARAS.

BASE:

$$n = \frac{0.29 Q}{d^2 (M)^{1/2}}$$

NOMENCLATURA:

- n = número de perforaciones en la mampara.
- Q = gasto de líquido usado para el diseño de la mampara, en galones por minuto, a la temperatura más alta.
- d = diámetro de la perforación, en pulgadas.
- M = altura del líquido en la mampara, en pulgadas.

OBSERVACIONES:

- 1.- Las perforaciones están localizadas a 60 grados, en un arreglo triangular.
- 2.- Arreglo de 2, 3 a 4 veces el diámetro de la perforación son las más comunes.
- 3.- Perforaciones de 3/4 de in. son las más populares.

MANERA DE USARSE:

- 1.- Entre al nomograma del lado izquierdo con el diámetro de la perforación.
- 2.- Trace una línea que una el diámetro de la perforación a la escala hf. Marque donde la línea corte con la línea Índice A.
- 3.- Trace una línea desde esta marca a través del gasto del

## 2.4.H.a. AREA PERFORADA EN LAS MAMPARAS.

BASE:

$$n = \frac{0.29 Q}{d^2 (hl)^{1/2}}$$

### NOMENCLATURA:

- n = número de perforaciones en la mampara.
- Q = gasto de líquido usado para el diseño de la mampara, en galones por minuto, a la temperatura más alta.
- d = diámetro de la perforación, en pulgadas.
- hl = altura del líquido en la mampara, en pulgadas.

### OBSERVACIONES:

- 1.- Las perforaciones están localizadas a 60 grados, en un arreglo triangular.
- 2.- Arreglo de 2.5 a 4 veces el diámetro de la perforación son las más comunes.
- 3.- Perforaciones de 3/4 de in. son las más populares.

### MANERA DE USARSE:

- 1.- Entre al nomograma del lado izquierdo con el diámetro de la perforación.
- 2.- Trace una línea que una el diámetro de la perforación a la escala hl. Marque donde la línea corte con la línea Índice A.
- 3.- Trace una línea desde esta marca a través del gasto del

líquido, extendiéndola hasta cortar la escala n. Este es el número total de perforaciones.

#### EJEMPLO:

El gasto de líquido para una torre de mamparas perforadas es de 1.200 gpm. se ha mantenido una altura hidrostática de líquido de 2 in. ¿Cuántas perforaciones de 3/4 de in. se requieren en este plato o mampara?

Haciendo los pados anteriores encontramos que son: 438 perforaciones de 3/4 de pulgada.

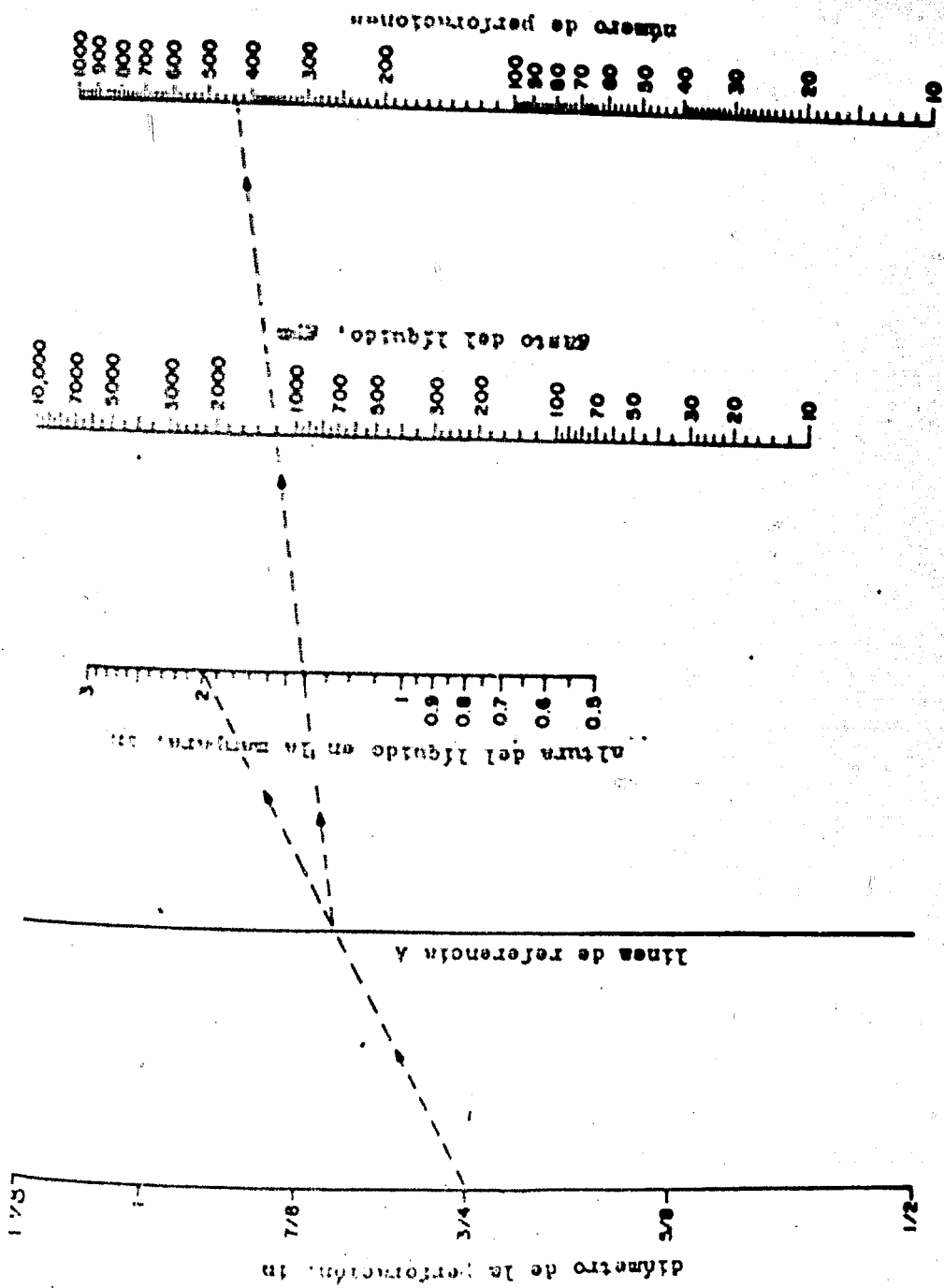


FIGURA 48

## 2.4.H.B. - PORCENTAJE DE AREA ABIERTA EN UNA TORRE DE MAMPARAS PERFORADAS.

BASE:

NOMENCLATURA:

$D_t$  = diámetro de la torre, en ft.

$W_{fp}$  = ancho de la mampara (flowpath) en in.

$W_o$  = ancho de la abertura.

OBSERVACIONES:

Sólo se usa para platos de mamparas perforadas.

MANERA DE USARSE:

1.- Con cualquier par de valores que tengamos de: diámetro de la torre, ancho de la mampara (flowpath), traslape --- (overlap) ó ancho de la abertura, se traza una línea recta, encontrando así los demás valores, y además el % de --- área abierta.

EJEMPLO:

Para una torre de mamparas perforadas, cuyo diámetro es de 7 ft y su overlap es de 21 in., encontrar el % de área abierta y las demás dimensiones de la mampara.

Llevando a cabo las instrucciones anteriores obtenemos el siguiente resultado:

$$W_{fp} = 33 \text{ in.} \quad 32\% \text{ de área abierta} \quad W_o = 31.5 \text{ in.}$$

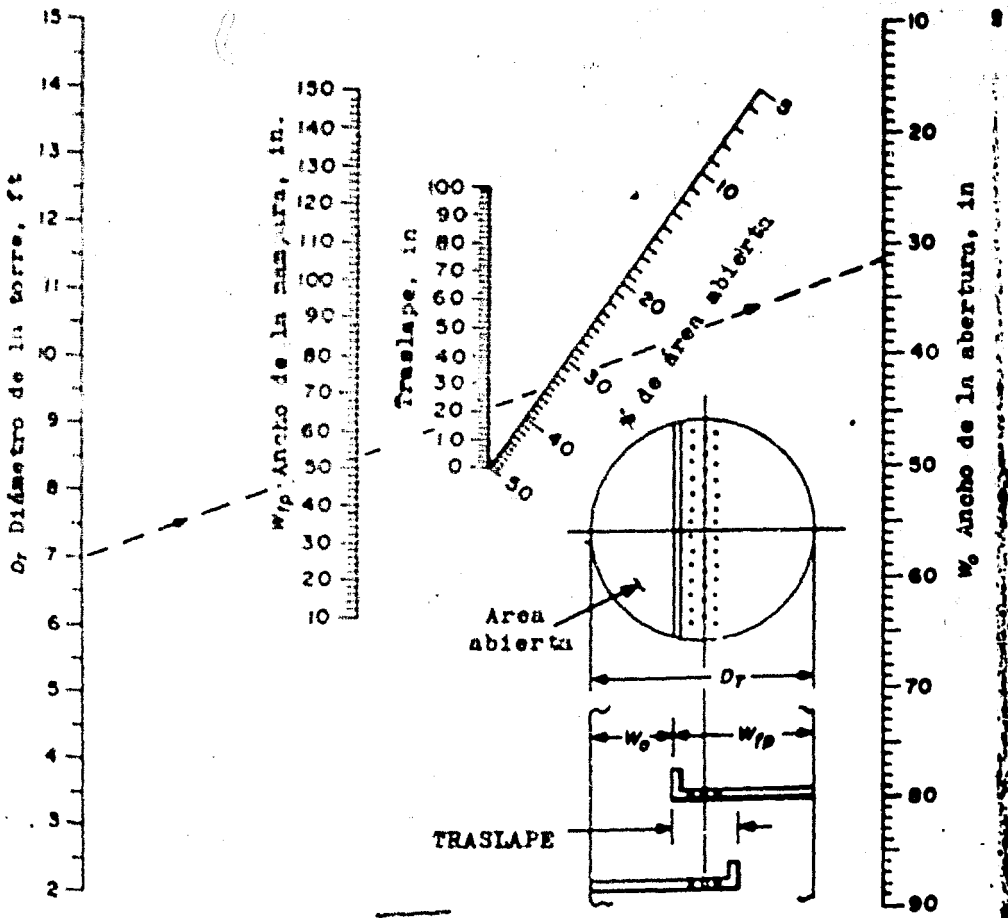


FIGURA 49

**2.4.1. - VELOCIDAD PERMISIBLE DEL VAPOR.**

## 2.4.1.4. - VELOCIDADES MÁXIMAS PERMISIBLES DEL VAPOR EN TORRES DE PLATOS CON CACHUCHAS.

BASE: Semi-empírica:

$$u = k \sqrt{( \rho_l / \rho_v - 1 )}$$

### NOMENCLATURA:

- $u$  = velocidad máxima permisible del vapor en ft/seg.
- $\rho_l$  = densidad del líquido
- $\rho_v$  = densidad del vapor en las mismas unidades
- $k$  = coef.  $F$  (sello del líquido, distancia entre platos).

### OBSERVACIONES:

- 1.- El sello del líquido ha sido definido, como la profundidad del líquido puro sobre el tope de la ranura de la cachucha.
- 2.- El valor de  $k$  es obtenido experimentalmente.
- 3.- Para absorbedores hidrocarbonados use el 65 al 80 % de las velocidades obtenidas en el nomograma.

### MODO DE USARSE:

- 1.- El punto inicial es la altura del sello del líquido.
- 2.- De este punto, se traza una línea vertical hasta el valor de la distancia entre platos, obteniéndose un nuevo punto, el cual se corre horizontalmente hasta la última línea de la gráfica.
- 3.- El nuevo punto obtenido se une con el valor de la relación entre la densidad del líquido y del vapor, cruzando la línea



de la velocidad permisible del vapor.

4. - Se lee la respuesta, en la línea de la velocidad permisible del vapor.

#### EJEMPLO

Para una distancia entre platos de 12 in. y un sello del líquido de 2.5 in. y una relación de densidades de  $1 \times 10^3$  obtener la velocidad máxima permisible del vapor:

Seguendo las instrucciones anteriores obtenemos una velocidad permisible del vapor de 1.7 ft/seg.

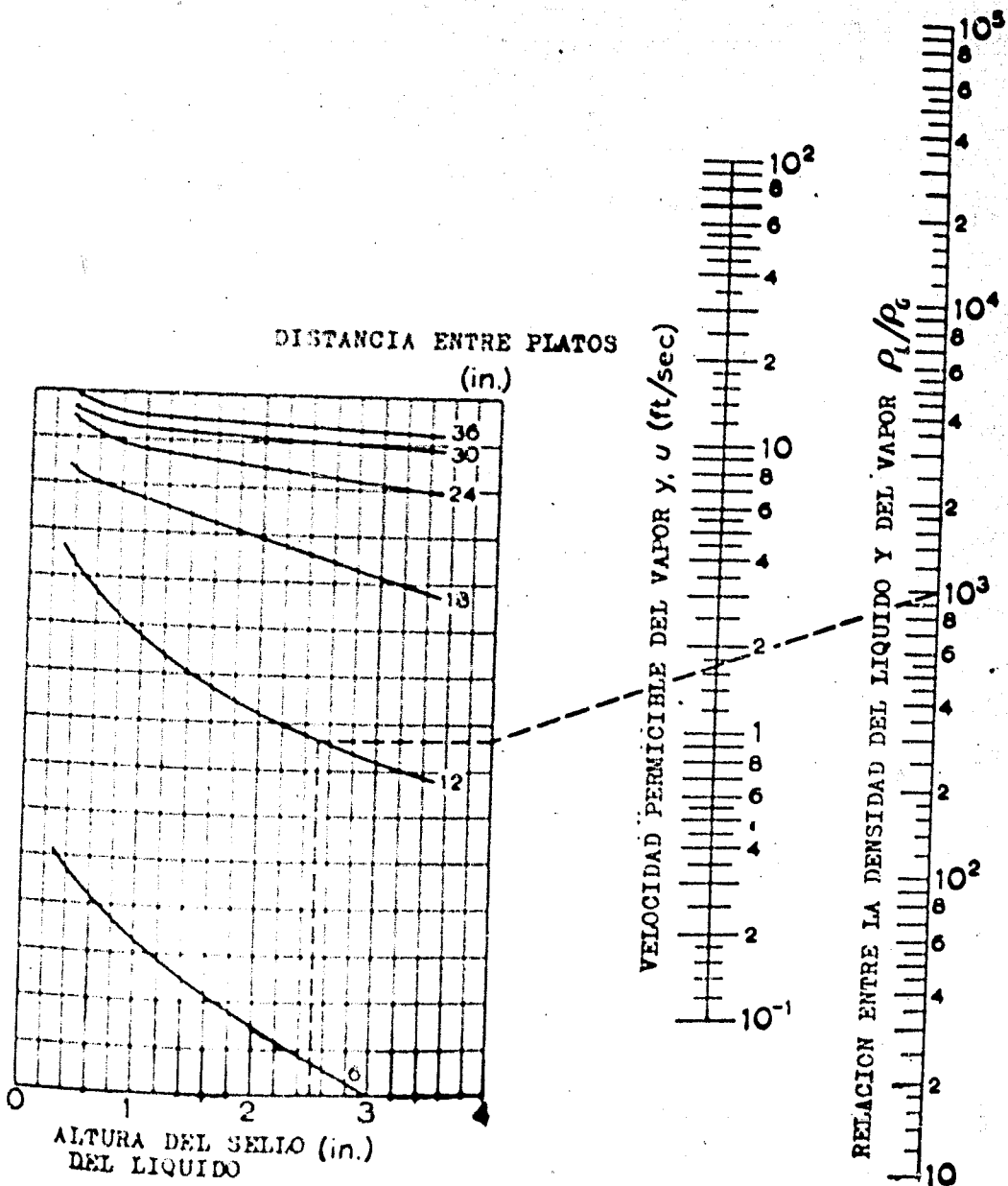


FIGURA 50

#### 2.4.J. - CAIDAS DE PRESION.

## 2.4. J.4. - CAIDA DE PRESION EN PLATO SECO. (PLATOS PERFO-

RADOS)

BASE:

$$h_p = 12 \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} + 1 \right) (1.14) \left( \frac{u_o^2}{2g_c} \right) \left[ 0.4 \left( 1.25 - \frac{A_o}{A_c} \right) + \left( 1 - \frac{A_o}{A_c} \right)^2 \right]$$

NOMENCLATURA:

- $h_p$  = caída de presión en plato seco, en in. de líquido.
- $\rho_v$  = densidad del vapor, en lb/ft<sup>3</sup>.
- $\rho_l$  = densidad del líquido, en lb/ft<sup>3</sup>.
- $u_o$  = velocidad del vapor a través de las perforaciones, en ft/seg.
- $g_c$  = factor de conversión, 32.2 lb/lb fuerza.
- $A_o$  = área de la perforación, en ft<sup>2</sup>
- $A_c$  = área de la sección transversal de la columna, permisible para el flujo de vapor, en ft<sup>2</sup>

OBSERVACIONES:

1. - Este nomograma puede ser usado sin un error significativo a menos que  $t/d_o$  sea muy pequeño; es preferible que sea igual a 1.

Siendo:  $t$  el espesor del plato, y  $d_o$  el diámetro de la perforación.

MODO DE USARSE:

1. - Con la relación de área perforada y la relación de densi--

dades, trazamos una línea recta, cruzando de este modo la línea de referencia.

2. - Uniendo el punto obtenido en la línea de referencia, con el punto dado en la escala de la velocidad del vapor a través de las perforaciones y llevando la línea hasta cruzar la escala de la caída de presión en plato seco, en donde leemos la respuesta.

#### EJEMPLO:

Encontrar la caída de presión en plato seco, para los siguientes datos de una torre con platos perforados:

$$A_d / A_c = 0.10$$

$$p_v / p_l = 0.0445$$

$$u_d = 9.0 \text{ ft/seg.}$$

Siguiendo las indicaciones anteriores, encontramos que la caída de presión en plato seco, para las condiciones anteriores -- es de 0.94 in. de líquido en consideración.

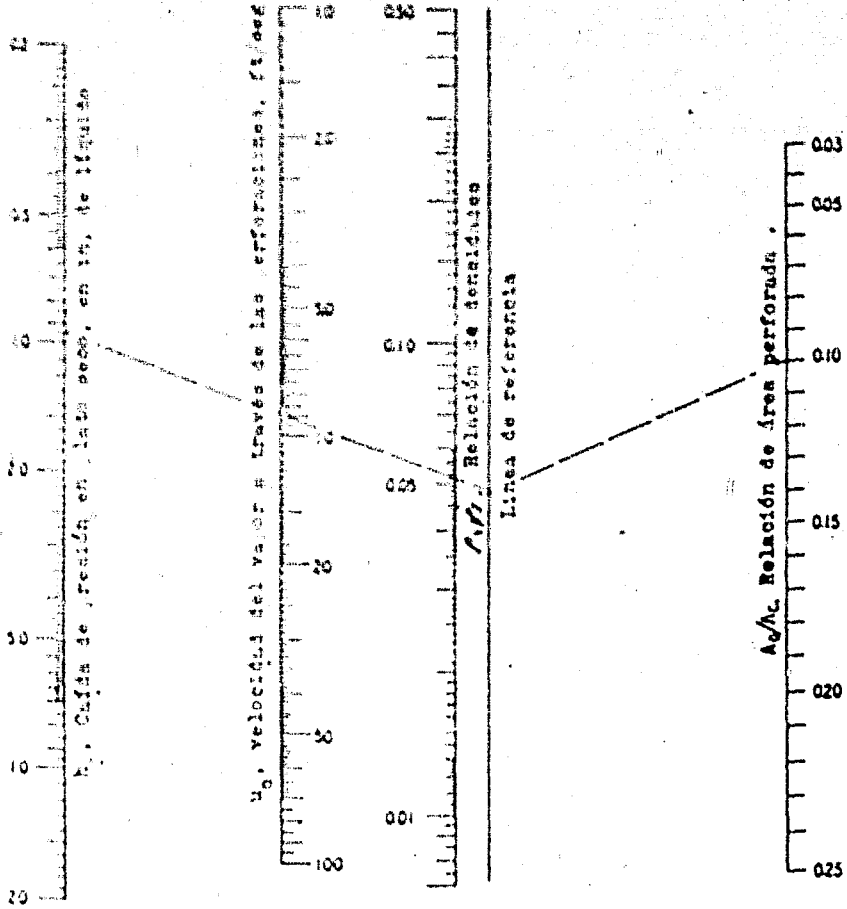


FIGURA 51

**2.4. K. - CALCULO DE LAS CACHUCHAS.**

## 2.4. K. a. - ABERTURA DE LA RANURA DE LAS CACHUCHAS.

BASE: Empírica:

$$\left( \frac{Q_s h_s}{W_2} \right) \left( \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right)^{1/2} = \frac{c(2g)^{1/2}}{(12)^{5/2}} \left[ \frac{h_o^{5/2}}{15} + \left( \frac{W_1}{W_2} \right) \left( \frac{2h_s(h_o)^{3/2}}{3} - \frac{4(h_o)^{5/2}}{15} \right) \right]$$

NOMENCLATURA:

- $c$  = coeficiente de orificio, tomado como 0.57 (dato experim)
- $Q_s$  = velocidad del vapor por la ranura, en  $FT^3/seg.$
- $h_o$  = abertura de la ranura, en in.
- $h_s$  = altura de la ranura, en in.
- $\rho_l$  = densidad del líquido, en  $lb/ft^3$
- $\rho_v$  = densidad del vapor, en  $lb/ft^3$
- $W_1$  = ancho de la ranura en la parte superior, en in.
- $W_2$  = ancho de la ranura en la parte inferior, en in.
- $g$  = constante gravitacional =  $32.2 \text{ ft/seg}^2$

OBSERVACIONES:

Para ranura rectangular o triangular, la ecuación anterior, se reduce a la de M. C. Rogers y E. W. Thiele.

Los nomogramas son particularmente usados, cuando las ranuras son trapezoidales; para este caso la solución de la ecuación envuelve error de operación.



La ecuación anterior, también como el nomograma no se aplica para ranuras abiertas abajo del punto de burbuja incipiente o -- después de el punto de la ranura completamente abierta. Para éste ver: J. L. Hult y R. L. Huntington.

#### MODO DE USARSE:

Unir los valores conocidos por las fracciones, sobre las dos -- escalas extremas y lea la abertura de la ranura sobre las curvas, en el punto apropiado para el valor de la altura de la ranura.

#### EJEMPLO:

Encontrar la abertura de la ranura de las cachuchas, cuya ranura es del tipo rectangular, donde  $W_1 = W_2$ , conociendo que:

$$\text{vapor} = 0.0482 \text{ lb/ft}^3, \quad \text{líquido} = 72.0 \text{ lb/ft}^3, \quad h_g = 1$$

in y donde  $Q_g = 0.1 \text{ ft}^3/\text{seg}$ .

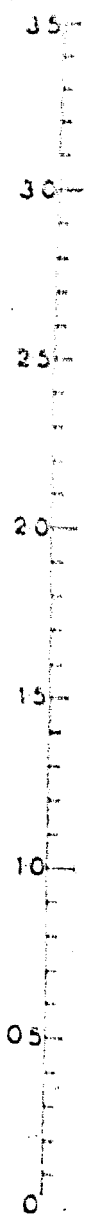
El valor para la primera escala será:

$$Q_g \times \frac{W_1}{W_2} \times \left( \frac{\frac{\rho}{\gamma_v}}{1 - \frac{\rho}{\gamma_v}} \right)^{1/2} \times 1,000$$

$$0.1 \times 1 \times \left( \frac{0.0482}{72.0 - 0.0482} \right)^{1/2} \times 1,000 = 2.6$$

Ubicando el 2.6 en la escala izquierda y 1 en la escala derecha -- y para ha de 1 in obtenemos:

$$h_g = 0.57 \text{ in.}$$



$$C_0 \times \frac{W_1}{W_2} \times \left( \frac{F_1}{F_1 - F_2} \right) \times 1,000$$

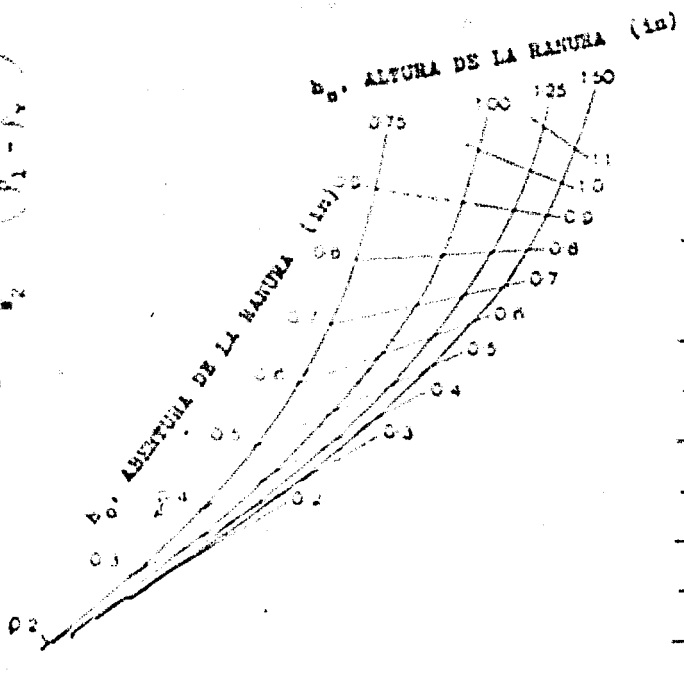
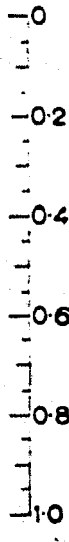
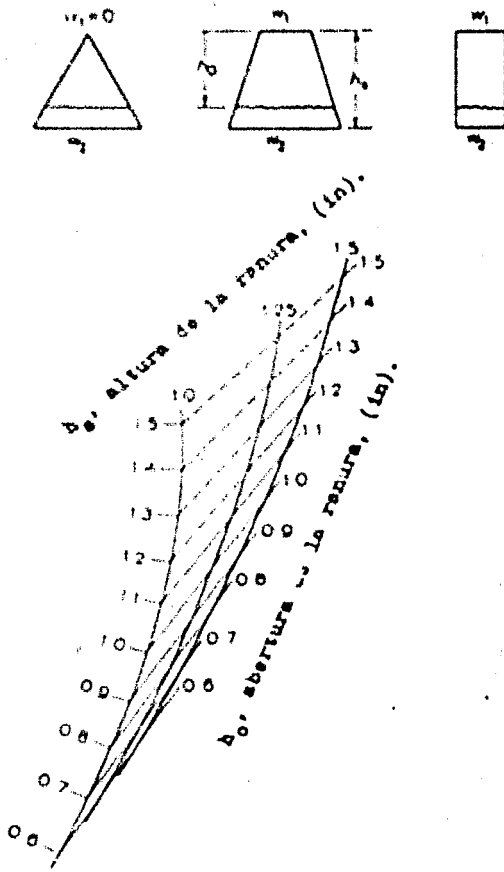


FIGURA 5

(4)  $\frac{W_1}{W_2}$  ancho de la ranura en la parte superior  
 (5)  $\frac{W_1}{W_2}$  ancho de la ranura en la parte inferior



$\frac{b_1}{b_2}$ , ancho de la ranura en la parte superior  
 $\frac{b_1}{b_2}$ , ancho de la ranura en la parte inferior

FIGURA 51

### CAPITULO III.

#### 3.- ABSORCION.

**3.1. - FACTOR DE ABSORCION.**

### 3.1.3. - FAC TOR DE ABSORCION.

BASE:

$$E = \frac{A^{N+1} - A}{A^{N+1} - 1}$$

NOMENCLATURA:

- E = eficiencia de la operación.
- A = factor de absorción.
- N = número de platos teóricos requeridos o etapas.

OBSERVACIONES:

Es usado para el diseño de absorbedores de multicomponentes y en columnas de este tipo.

Es un método iterativo.

La figura 2, es para un rayo cuya eficiencia de operación es al ta.

En el caso de que  $A = 1$ , estas cartas dan una infinidad de soluciones, debido a la forma de la ecuación, por lo tanto la ecuación se simplifica, teniendo que hacer los cálculos manualmente:

$$E = \frac{N}{N+1}$$

MANERA DE USARSE:

1. Hacer el simple cálculo de  $A - E$
2. Trazar una línea de  $(A-E)$  cruzando por A hasta encontrar el valor de la intersección en la malla, de N y E.

**EJEMPLO:**

Encontrar el coeficiente de absorción para una absorción en la cual  $E = 0.98$  y  $N = 9$

1. - suposición:  $(A - E) = 0.3$      $A = 12.8$      $A_N = 13.1$

2. - suposición:  $(A - E) = 0.35$      $A = 13.3$      $A_N = 13.3$

Respuesta:  $A = 13.3$

$A_N =$  obt. por el nom.

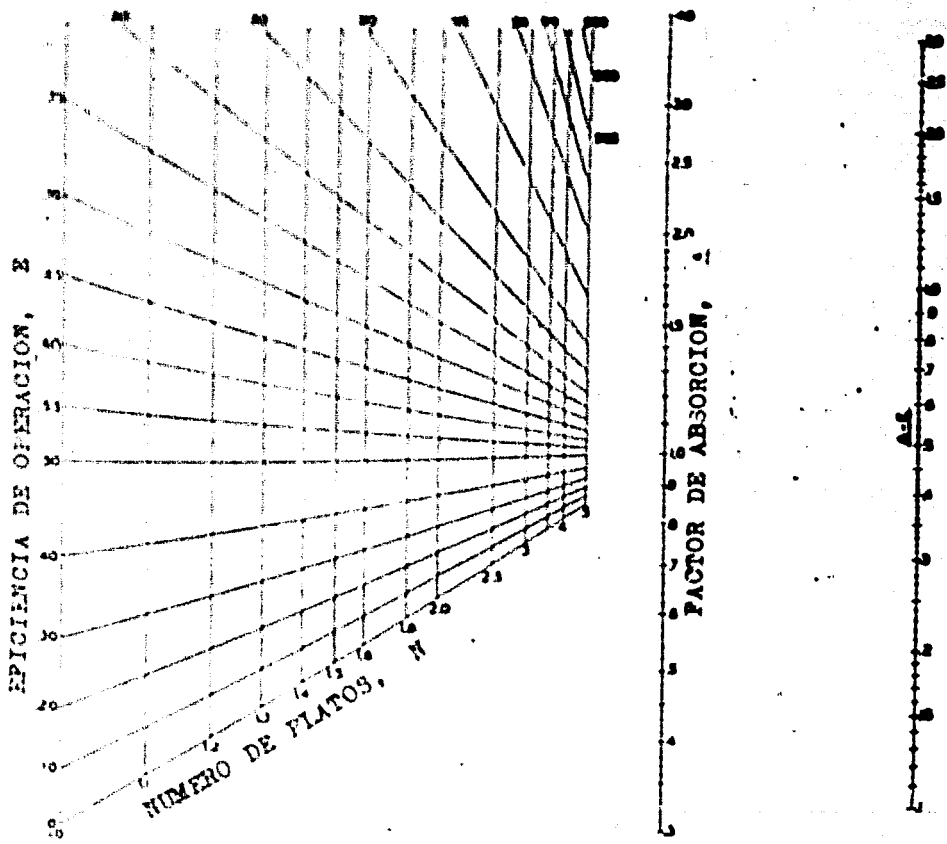


FIGURA 54



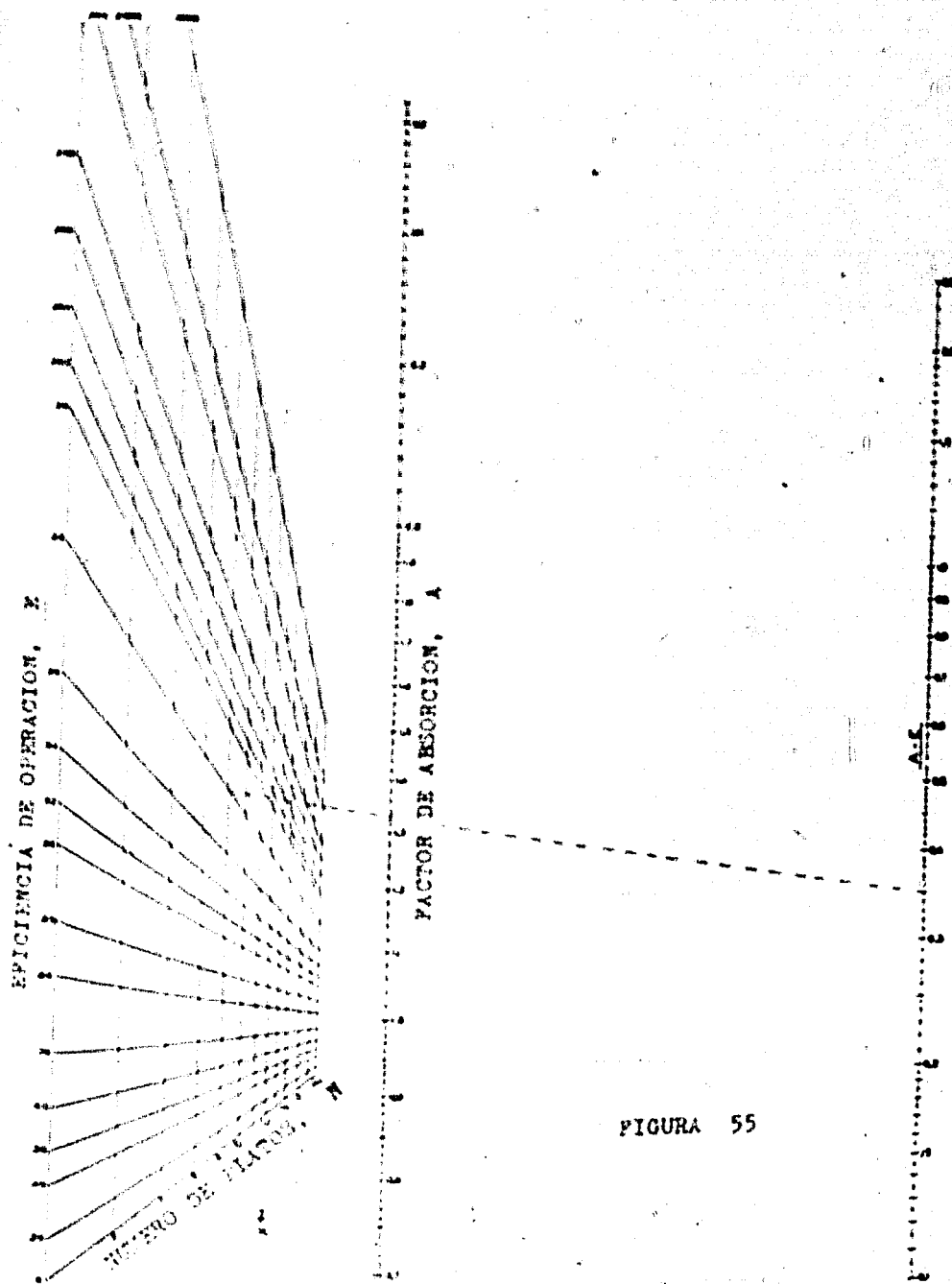


FIGURA 55

3.2. - NUMERO DE UNIDADES DE  
TRANSFERENCIA.

### 3.2.a. - GRADIENTES MEDIOS LOGARITMICOS EN PROBLEMAS DIFUSIONALES.

BASE:

$$\Delta Y_m = \frac{S}{2.3 \log \frac{U+S}{U-S}}$$

NOMENCLATURA:

$\Delta Y_m$  = gradiente medio logarítmico

$$S = \sqrt{(y_1 - y_2 + m_1x_2 - m_2x_1)^2 + 4(x_1y_2 - x_2y_1)(m_1 - m_2)}$$

$$\delta = \sqrt{(m_2x_1 - m_1x_2 + y_2 - y_1)^2 + 4(x_1y_2 - x_2y_1)(m_1 - m_2)}$$

$$U = y_1 + y_2 - m_1x_2 - m_2x_1$$

$\delta$

$$m_2x_1 + m_1x_2 - y_1 - y_2$$

$x$  = concentración en una fase (líquida).

$y$  = concentración en la otra fase (gaseosa).

$$m = y^* / x$$

$y^*$  = concentración en equilibrio con  $x$ .

$m_1, m_2$  = valores que determinan la relación en consideración.

#### OBSERVACIONES:

1. Si  $m_1 = m_2$ , entonces que  $\delta = 0$ , se simplifica que  $U = S$ , se usa esta simplificación.

2. En los casos en que  $m_1$  y  $m_2$  se refieren a las ecuaciones del equilibrio.

3.- Para el caso en que el signo bajo la raíz cuadrada fuera -- negativo, no se aplica este nomograma.

4.- Para el caso particular, cuando  $S = 0$ ,  $y_m = U/2$

#### MANERA DE USARSE:

Está explicado en el croquis incertado en el nomograma, ad-- más lo explicaremos con el ejemplo.

#### EJEMPLO:

En el trabajo de Dwyer y Dodge, en la absorción de amoníaco -- en agua, el número de unidades de transferencia en 73 corri -- das fué calculado de acuerdo con la consideración básica en la derivación de la fórmula; ésto es, el valor de  $m_1$  (el cuál depen -- de directamente de la temperatura) varía linealmente con la -- cantidad de amoníaco absorbido. Los datos dan:  $y_1 = 0.01851$   $y_2 = 0.00120$ ,  $x_1 = 0.00502$  y  $x_2 = 0$ ; los datos del equilibrio para amoníac en agua dan:  $m_1 = 1.092$  y  $m_2 = 1.138$ ; de aquí que los valores calculados de  $U$  y  $S$  son respectivamente 0.0140 y 0.0155 .

Calcular el gradiente medio logarítmico, y con esto calcular el número de unidades de transferencia.

Unimos los valores de  $S$  y  $U$  (en las escalas paralelas) llevando la línea hasta la escala de referencia, en nuestro caso particu -- lar unimos: 0.0140 con 0.0155 y en la línea de referencia lee -- mos 10.5, el cual volvemos a unir con el valor de  $S$  pero ahora

en la otra escala, continuando la línea hasta cortar la escala -  
del  $\Delta Y_m$ , el cual leemos 0.00498 y con este valor obtenemos  $N_t = 3.48$

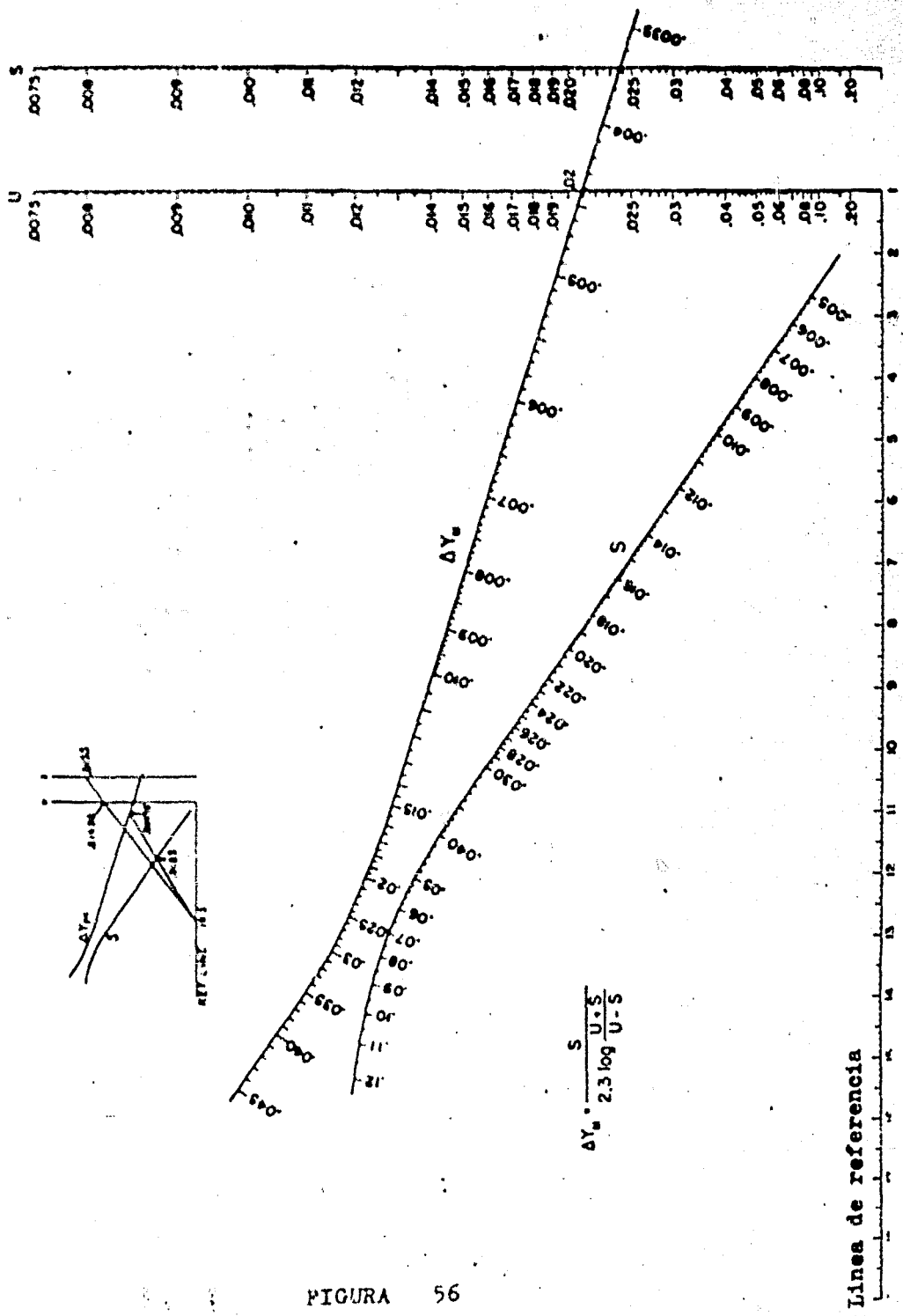


FIGURA 56

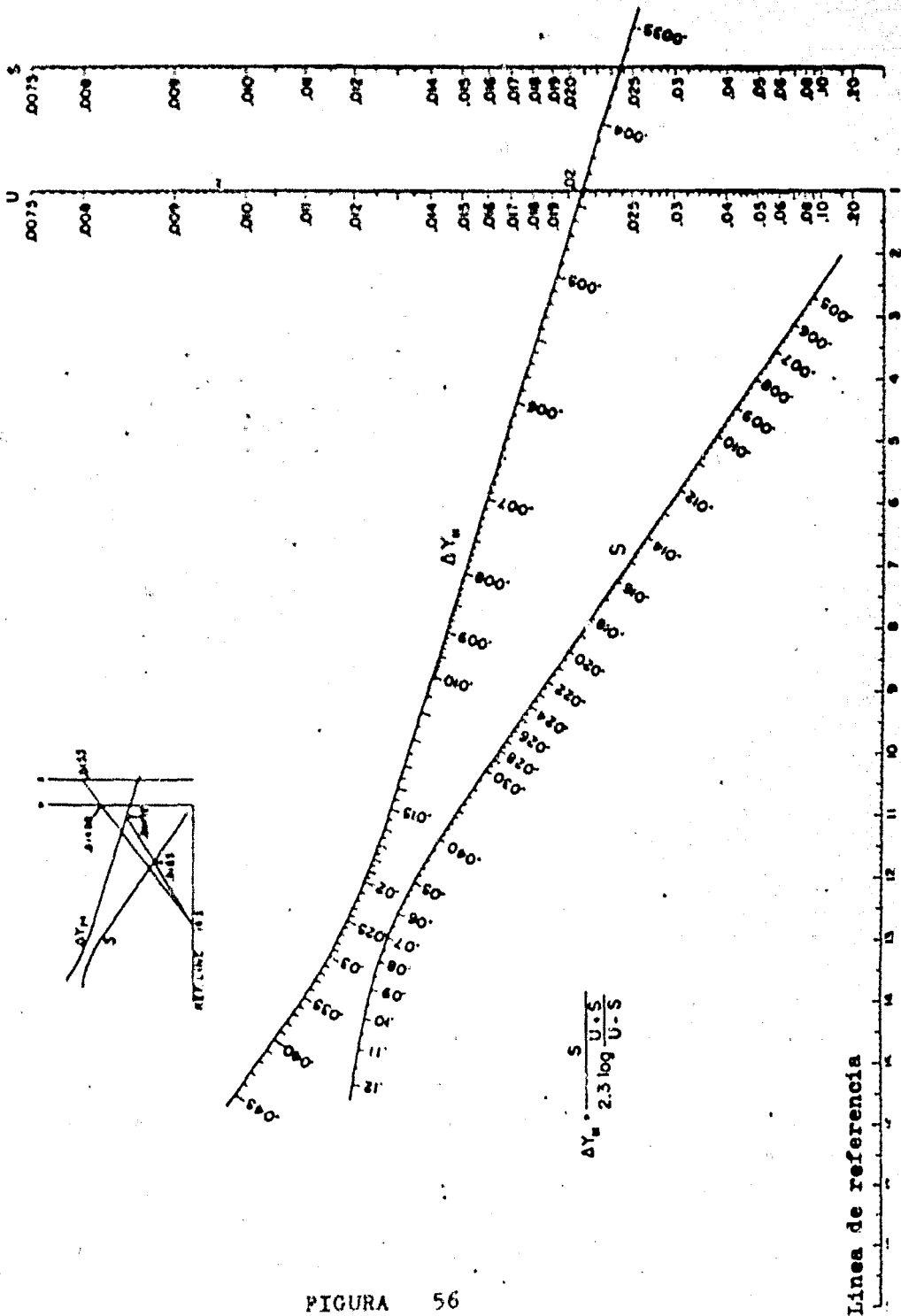


FIGURA 56

1.2.b. - GRADIENTES MEDIO LOGARITMICOS PARA PROBLEMAS

DIFUSIONALES.

BASE

$$\Delta Y_m = \frac{S^*}{2 \tan^{-1} \frac{S^*}{U}}$$

NOMENCLATURA:

$\Delta Y_m$  = gradiente medio logarítmico.

$$S = \frac{\sqrt{4(x_2 y_1 - x_1 y_2)(m_1 - m_2) - (y_1 - y_2 + m_1 x_2 - m_2 x_1)^2}}{\delta}$$

$$\sqrt{4(x_2 y_1 - x_1 y_2)(m_1 - m_2) - (m_2 x_1 - m_1 x_2 + y_2 - y_1)^2}$$

$$U = y_1 + y_2 - m_1 x_2 - m_2 x_1$$

$\delta$

$$m_2 x_1 + m_1 x_2 - y_1 - y_2$$

$$m = y^*/x$$

$x$  = concentración en una fase (líquida).

$y$  = concentración en la otra fase (gaseosa).

$y^*$  = concentración en equilibrio con  $x$ .

1, 2 = valores que determinan la sección en consideración.

OBSERVACIONES:

1. - Es usado para el caso de que el signo bajo la raíz cuadrada es negativo es decir cuando  $(S)^2 = -S^2$
2. - Otras restricciones vienen dadas en las dimensiones -- de las escalas usadas.



## MANERA DE USARSE:

El croquis insertado en el nomograma, demuestra el uso del nomograma.

1. Se une el valor de  $S'$  con el valor de  $+U$ , o con  $-U$  cruzando así la línea de referencia.
2. Se une este punto en la línea de referencia con el valor de  $S'$  en la escala vertical, cruzando así la escala  $\Delta Y_m$

## EJEMPLO:

Encontrar el gradiente medio logarítmico de los siguientes da-

tos:  $y_1 = 0.01477$ ,  $y_2 = 0.00803$ ,  $x_1 = 0.01535$

$x_2 = 0$  y los datos de equilibrio son:  $m_1 = 0.975$  y  $m_2 = 1.511$

Haciendo las operaciones para encontrar el valor de  $U$  y  $S'$  encontramos:  $U = 0.00460$  y  $S' = 0.01159$

Haciendo los pasos indicados anteriormente, el valor encontrado en la línea de referencia es de 1.205, y el valor de  $\Delta Y_m$

$= 0.00482$

1.2.c. - GRADIENTES MEDIOS LOGARITMICOS EN PROBLEMAS DIFUSIONALES.

BASE

$$Y_m = \frac{S}{2.3 \log \frac{y_1 - m_2 x_1 + V}{y_2 - m_1 x_2 - V}}$$

NOMENCLATURA:

$Y_m$  = gradiente medio logarítmico.

$$S = (y_1 - y_2 + m_1 x_2 - m_2 x_1)^2 + 4(x_1 y_2 - x_2 y_1)(m_1 - m_2)$$

$$\text{ó}$$

$$(m_2 x_1 - m_1 x_2 + y_2 - y_1)^2 + 4(x_1 y_2 - x_2 y_1)(m_1 - m_2)$$

$$V = (x_1 y_2 - x_2 y_1)(m_1 - m_2) / (y_1 - y_2 + m_1 x_2 - m_2 x_1)$$

ó

$$(x_1 y_2 - x_2 y_1)(m_1 - m_2) / (m_2 x_1 - m_1 x_2 + y_2 - y_1)$$

$m$  =  $y / x$

$x$  = concentración en una fase (líquida)

$y$  = concentración en otra fase (gaseosa)

$y^*$  = concentración en equilibrio con  $x$

OBSERVACIONES:

1. - Este nomograma es usado cuando:  $U$  menor del 10% de  $S$ .

2. - Otras restricciones vienen dadas al construir el nomograma.

MANERA DE USARSE:

Dentro del nomograma trae esquema de cómo usarse.

1. - Se parte de la escala V, uniendo este valor con el valor de  $(y_2 - m_1x_2)$  en su escala respectiva, llevando la línea indefinidamente.
2. - Con el valor de  $(y_1 - m_2x_1 + V)$  en su escala respectiva se traza una línea hasta formar un ángulo recto con la línea del inciso (1), cruzando así la línea de referencia.
3. - Con el punto encontrado en la línea de referencia y con el valor de S, trazamos una línea recta, llevándola hasta cruzar con el valor de  $\Delta Y_m$ .

#### EJEMPLO:

Para los siguientes valores, encontrar el  $\Delta Y_m$ :

$$V = 0.0001, \quad (y_2 - m_1x_2) = 0.0007, \quad (y_1 - m_2x_1 + V) = 0.0250$$

$$S = 0.0242$$

Haciendo las indicaciones anteriores encontramos que

$$\Delta Y_m = 0.0065$$

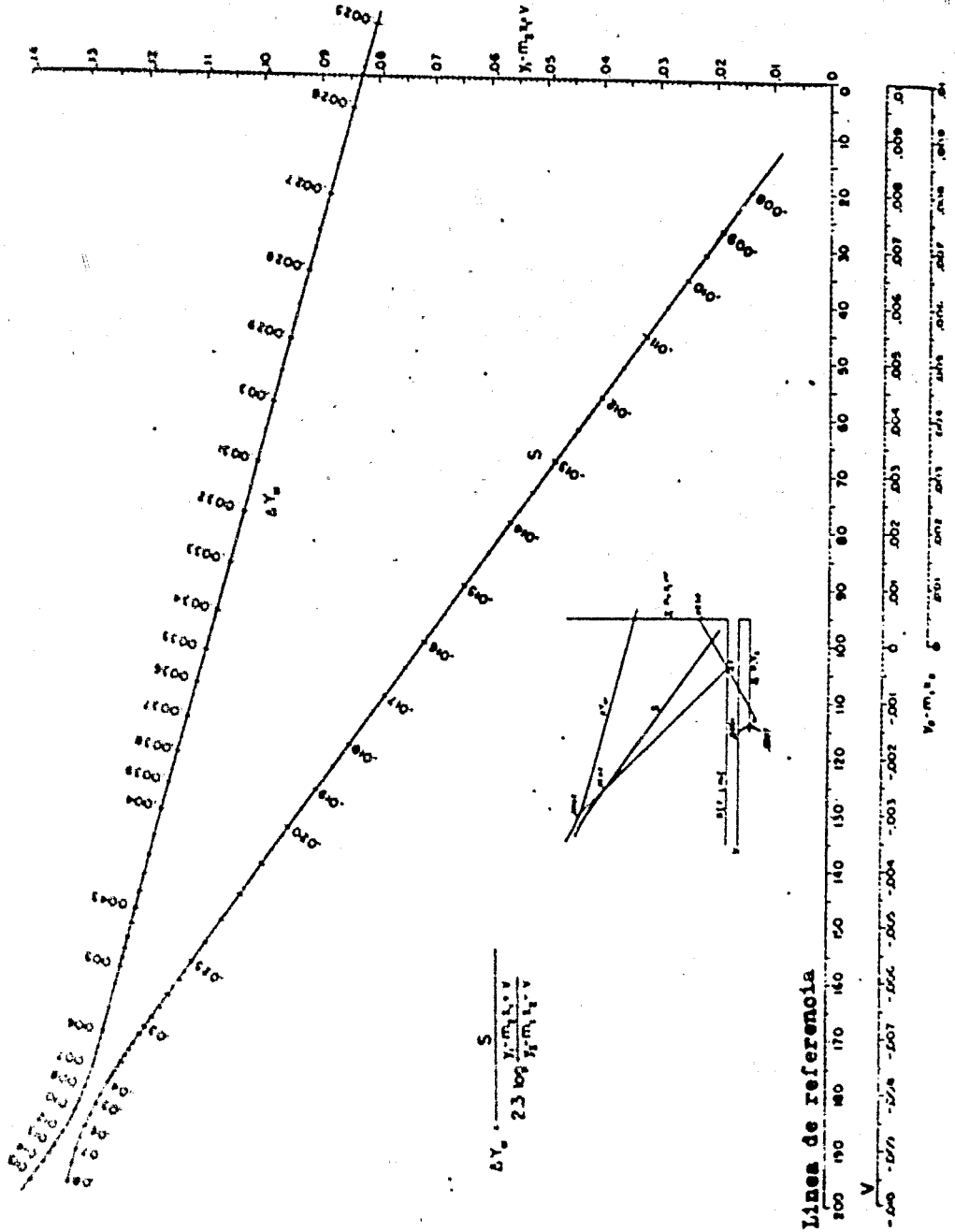


FIGURA 58

**3. 3. - ALTURA DE LA TORRE.**

### 3.3.a. - ALTURA DE TORRES EMPACADAS.

BASE: Empírica:

$$K_g A = \frac{N}{h \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{\ln \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}}}$$

#### NOMENCLATURA:

- N • velocidad de absorción, en lb mol/ hr. ft<sup>2</sup>.
- h • altura del empaque, en ft.
- $\Delta P_2$  • gradiente de presión en la parte inferior de la torre, en lb/in<sup>2</sup>
- $\Delta P_1$  • gradiente de presión en la parte superior de la torre, en lb/in<sup>2</sup>.

#### OBSERVACIONES:

Generalmente es usado, para cuando la absorción es acompañada por una reacción química.

#### MODO DE USARSE:

1. - Unir los datos de  $\Delta P_1$  y  $\Delta P_2$ , y obtener el  $\Delta P_m$ , que se hace al cruzar su escala.
2. - Con este punto, se hace una simple transportación del valor a la escala  $R_1$ .
3. - El punto obtenido en la escala  $R_1$ , se une por medio de -- una línea, con el dato de  $K_g A$ , cruzando así la escala  $R_2$ .

4. - Con el punto obtenido en  $R_2$ , se une con el valor de  $N$ , por medio de otra línea, continuándola hasta cortar con la escala  $h$ , donde se lee la respuesta.

**EJEMPLO:**

Para los siguientes datos, encontrar la altura de la columna -

empacada:  $N = 16.6 \text{ lb mol/lhrft}^2$

$$K_g A = 0.429 \text{ lb/mol / hr atm ft}^3$$

$$\Delta P_2 = 49.7 \text{ lb/in}^2$$

$$\Delta P_1 = 3.3 \text{ lb/in}^2$$

Siguiendo todos los pasos anteriores, encontramos que:

$$h = 32 \text{ ft}$$

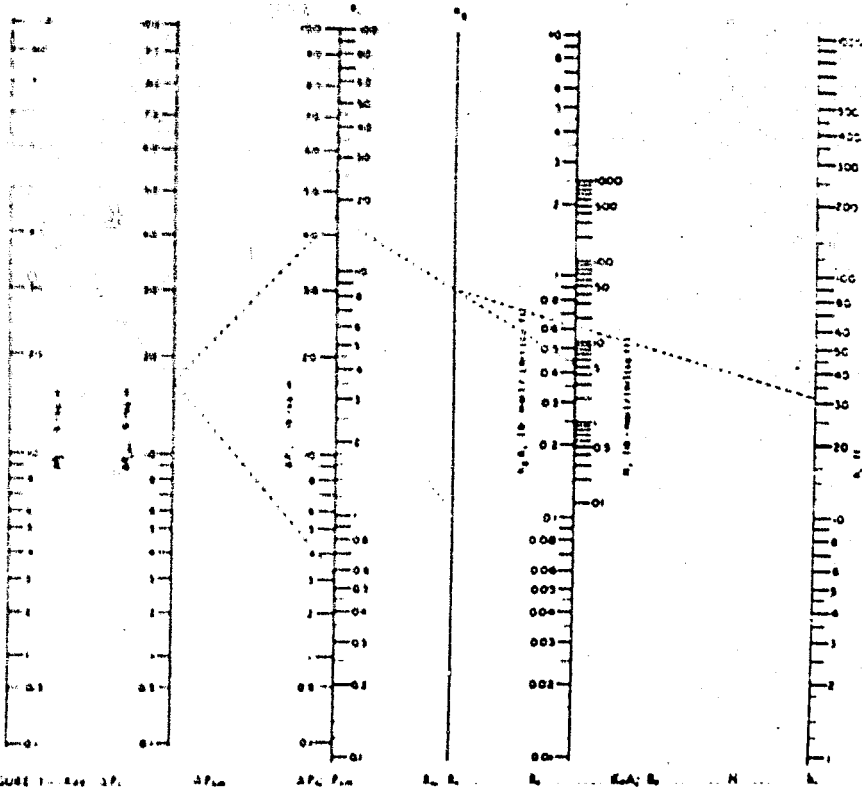


FIGURE 1. See 37.

FIGURA 59



#### **J.4.- FACTOR DE INUNDACION.**

### 3.4.a. - FACTOR DE INUNDACION PARA TORRES EMPACADAS.

BASE: Empírica:

$$(F) = \frac{G^2 C_f U^2 \mu_L^{0.2}}{\rho_g \rho_L \rho_c}$$

#### NOMENCLATURA:

- F • factor de inundación.
- G • masa velocidad del gas, en lb/hr ft<sup>2</sup>
- C<sub>f</sub> • factor característico del empaque, en l / ft<sup>2</sup>
- U • relación de la densidad del agua a la densidad del líquido.
- μ<sub>L</sub> • viscosidad del líquido, en centipoises.
- ρ<sub>g</sub> • densidad del gas, en lb / ft<sup>3</sup>
- ρ<sub>L</sub> • densidad del líquido, en lb / ft<sup>3</sup>
- ρ<sub>c</sub> • factor gravitacional = 4.17 x 10<sup>8</sup> lb masa ft / lb fuerza hr<sup>2</sup>.

#### OBSERVACIONES:

Es una correlación para varios empaques, para sistemas aire - agua, con soluciones de sacarosa y para sistemas hidrocarburos - aceite. La tabla de los diferentes empaques es:

| Tipo de Empaque | Dimensiones nominales | C <sub>f</sub> |
|-----------------|-----------------------|----------------|
| Anillos raschig | 3/4                   | 182            |
| "               | 1                     | 155            |

| Tipo de Empaque                       | Dimensiones nominales | $C_f$ |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|
| Anillos raschig porcelana             | 1 1/2                 | 97    |
| "                                     | 2                     | 75    |
| Anillos raschig acero 1/16 de grueso. | 1                     | 115   |
| "                                     | 2                     | 75    |
| Silletas Berl Porcelana               | 3/4                   | 138   |
| "                                     | 1                     | 82,2  |
| "                                     | 1 1/2                 | 76    |
| Silletas Intalox Porcelana            | 1                     | 81    |
| "                                     | 1 1/2                 | 77    |
| Telleretes HD Polietileno             | 1                     | 57    |
| Polietileno LD                        | 1                     | 65    |
| Anillos Pall acero al Carbón          | 1                     | 45    |
| "                                     | 2                     | 17    |

#### MODO DE USARSE:

Unir con una línea las columnas  $\rho_g$  y G, cruzando la línea -

$J_1$  :

2. - Con este punto y el punto correspondiente a  $\rho_L$  cruzar

la línea  $J_2$ .

3. - Con este punto y el punto correspondiente a  $C_f$  cruzar la -

línea  $J_3$ .

4. - Con este punto, y el correspondiente a  $\mu_L$  cruzar la --

línea F y leer la respuesta.

**EJEMPLO:**

Obtener el factor de inundación de una torre empacada con anillos raschig de porcelana de 1 1/2 in de diámetro. El sistema es de aire agua, con una masa velocidad del aire de 500 lb/hr - ft<sup>2</sup> a presión de una atmósfera y a una temperatura de 20 grados centígrados.

Con estos datos obtenemos:

$$\mu_{\text{agua}} = 1 \text{ cp}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 0.0808 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 62.4 \text{ lb/ft}^3$$

Siguiendo los pasos que se indican anteriormente obtenemos un factor de inundación (F) = 0.0118

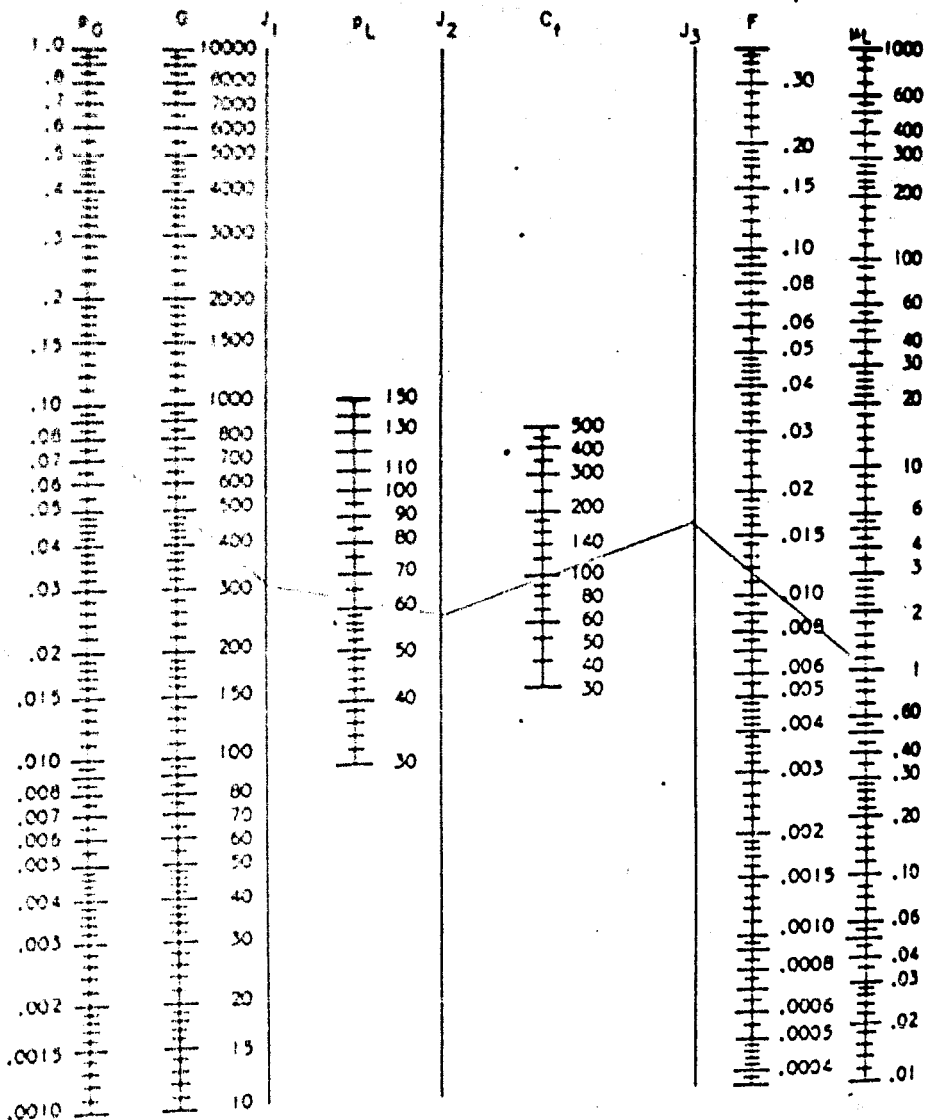


FIGURA 60

### 3.5. - DIAMETRO DE LA TORRE

# 1.5.a. - DISEÑO DE COLUMNAS EMPACADAS.

BASE: Semi-empírica      Correlación de Leva

$$U = \frac{K \rho_g}{C \rho_l} \quad D^2 = \frac{F}{47.1 U}$$

## NOMENCLATURA:

- U = velocidad superficial del gas, en ft/seg.
- $\rho_g$  = densidad del gas, en lb/ft<sup>3</sup>
- $\rho_l$  = densidad del líquido, en lb/ft<sup>3</sup>
- C = coeficiente de carga (para el nomograma)
- $\mu$  = viscosidad del líquido, en cp.
- D = diámetro, en ft.
- F = flujo actual de gas, en ft<sup>3</sup>/min.
- F<sub>c</sub> = factor de carga

$$F_c = L/G \left( \rho_g / \rho_l \right)^{0.5}$$

## OBSERVACIONES:

El nomograma da: la caída de presión, la velocidad superficial del gas y el diámetro de la columna empacada.

El nomograma cubre el rango normal de las variables: para valores fuera de estos rangos, usar las ecuaciones anteriores y calcularlas manualmente.

Sólo es usado para anillos raschig (R) y para silletas intalox (S).

## MODO DE USARSE:

A) Para obtener el  $\Delta P$  de inundación:

- 1.- Se calcula el factor de carga y se localiza en su escala.
- 2.- Inmediatamente leemos el  $\Delta P$  de inundación.
- 3.- Trazamos una horizontal hacia la izquierda, tomando como base el punto dado en el eje del factor de carga y leemos la caída de presión a 60 % de inundación.

B) Para obtener la velocidad superficial permisible del vapor:

- 1.- Calcular el factor de carga y colocar el valor en su eje determinado.
- 2.- Unir el punto anterior con el correspondiente valor -- para el tipo de empaque usado, continuando la recta - hasta cruzar con el eje del coeficiente de carga (C)
- 3.- El punto obtenido en el inciso anterior, hay que unirlo al valor de la viscosidad del líquido, continuando, la línea hasta llegar a la línea de referencia 1.
- 4.- El punto obtenido en la línea de referencia 1, hay que unirlo con el valor de la densidad del gas, continuando la línea hasta llegar a la línea de referencia 2.
- 5.- Unir el punto obtenido en la línea de referencia 2 con la escala  $\rho_l / \rho_g$  en el valor indicado, siguiendo la línea hasta llegar a cruzar el eje U y ahí leemos la



velocidad superficial permisible del vapor.

C) Para obtener el diámetro de la columna:

- 1.- Se hacen todos los cálculos anteriores del inciso (B).
- 2.- Después de conocer la velocidad superficial permisible del vapor, hay que unir este valor, con el valor correspondiente al flujo del gas, llevando la línea -- hasta el eje D, que es donde leemos el diámetro de -- la columna.

#### EJEMPLO:

Diseñar una columna empacada con  $F = 900 \text{ ft}^3/\text{min}$  de un gas cuya densidad es  $0.15 \text{ lb/ft}^3$  y  $70,000 \text{ lb/hr}$  de líquido, cuya densidad es de  $45 \text{ lb/ft}^3$  y su viscosidad es de  $4 \text{ cp}$ . Se usan anillos raschig de  $1''$ .

Se calcula el factor de carga:

$$L/G = 70,000 / 900 (0.15) (60) = 8.66$$

$$\rho_r = 45/0.15 = 300$$

$$F_c = 8.66 / (300)^{0.5}$$

$$F_c = 0.5$$

Siguiendo todos los pasos indicados en los incisos A, B, y C, obtenemos:

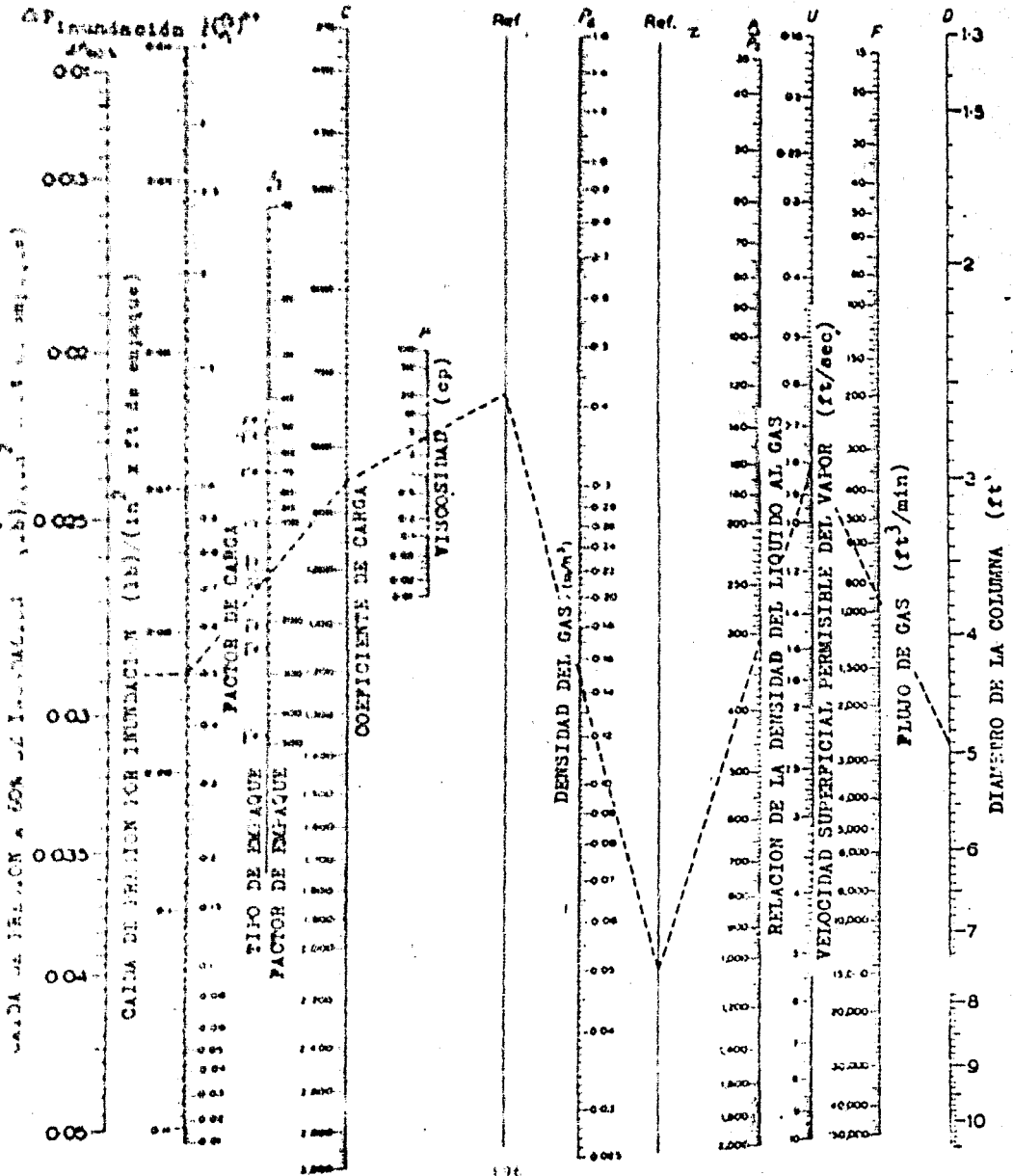
$$P \text{ de inundación} = 0.0835 \text{ lb/in}^2 \times \text{ft de empaque}$$

$$P \text{ a } 60\% \text{ de inundación} = 0.0288 \text{ lb/in}^2 \text{ Ft emp.}$$

La velocidad superficial permisible del vapor ( $U$ ) es igual a  $0.8 \text{ ft/seg}$ .

El diámetro de la columna es de  $4.9 \text{ ft}$ .

FIGURA 61



## BIBLIOGRAFIA

- Davis D. S. . . . Nomography & Empirical Equations . . . Mc. Graw  
Hill Book Co. Inc. . . . 1941.
- Karabarda
- Levens A. . . . Nomography.
- Atindad. . . . bimensual.
- British Chem Eng. . . . Heywood & Co. L. T. D. . . . Mensual.
- Chemical Abstracts. . . . American Chemical Soc. . . . Semanal.
- Chemical Engineering. . . . Mc. Graw Hill Co. . . . Bisemanal.
- Chemical Engineering News. . . . A. I. C. H. E. publications . . . quince-  
nal.
- Chemical Engineering Progress. . . . American Chemical Soc. . . .  
Mensual.
- Chemical Process Eng. . . . Morgan Grampian L. T. D. . . . Mensual.
- Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner. . . . Gulf Publishing Co.  
. . . . Mensual.
- Industrial & Eng. Chem. . . . American Chemical Soc. . . . Mensual.
- Petro/Chem. Eng. . . . Ed. The Petroleum Eng. Publishing Co. . . .  
Mensual.
- Revista de la Sociedad Química de México. . . . Edit. Muñoz, S. A. . . .  
Mensual.

**ESTE TRABAJO SE DESARROLLO EN  
GUADARRAMA IMPRESORES, S. A.  
AV. CUAUHEMOC NO. 1218, COL.  
VERTIZ NARVARTE MEXICO 13, D. F.  
TELEFONO 575 - 28 - 41**