



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CABEZALES DE DISTRIBUCION
MULTIPLE

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
POR ESENTA
MARCO ANTONIO DURAN PEÑA
MEXICO, D. F. 1979



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.

At. 109



PRESIDENTE Prof. ALEJANDRO ANAYA DURAND.
VOCAL Prof. ANTONIO FRIAS MENDOZA.
SECRETARIO Prof. JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ.
1er. SUPLENTE Prof. CLAUDIO A. AGUILAR MARTINEZ.
2o. SUPLENTE Prof. ENRIQUE BRAVO MEDINA.

Sitio donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.

SUSTENTANTE: MARCO ANTONIO DURAN PEÑA.

ASESOR DEL TEMA: I. Q. JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ.

A mis padres:

J. Trinidad y Ma. Francisca

A mis hermanos:

Ma. del Carmen

Agustín

Raúl (q.e.d.)

Arturo (q.e.d.)

Irma

Francisco

Patricia

A mi esposa:

Ma. Dolores

A mi amigo:

José Antonio Ortíz R.

A todos los que me han
brindado su amistad.

Con sincero agradecimiento al:
Instituto Mexicano del Petróleo.

R E S U M E N

En este trabajo se discute fricción, cambios de momentum y pérdidas en corrientes laterales en la distribución y colección de flujo presentes en los cabezales de distribución múltiple. Se presenta información para cuantificar los efectos de las ramas adyacentes en situaciones de distribución de flujo. Se da un método para determinar la distribución de flujo en cabezales tanto de descarga como de colección. Se ilustra un método simplificado de cálculo para evaluar la distribución de flujo en sistemas de ramas múltiples, tales como los que se encuentran en el flujo a través de varios cambiadores de calor conectados en paralelo.

Los conocimientos teóricos y prácticos presentados en el desarrollo de este trabajo, tienen su utilidad al final del mismo, cuando se da solución a un problema real que involucra el fenómeno de los cabezales de distribución múltiple. Para la solución al problema que se plantea, se desarrolló e implementó un programa de computadora que proporciona la información requerida para un análisis satisfactorio del fenómeno.

Se hace notar que se están analizando flujos que no están estabilizados completamente y para los cuales las constantes de las fórmulas están basadas en una cantidad limitada de resultados experimentales.

I N D I C E

| | PAG. |
|--|------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Teoría | 5 |
| 2.1 Distribución de Flujo | 6 |
| 2.2 Colección de Flujo | 10 |
| 3. Efectos de las Ramas Adyacentes | 13 |
| 4. Pérdidas para el Flujo en Ramas Inclınadas | 16 |
| 5. Ecuaciones para Cabezales de Distribución | 19 |
| 6. Ecuaciones para Cabezales de Colección | 24 |
| 7. Cálculo de Distribuciones de Flujo en Cabezales | 26 |
| 8. Métodos Simplificados para Sistemas de Cabezal | 29 |
| 9. Modelación del Problema | 37 |
| 10. Resultados | 40 |
| 11. Conclusiones | 67 |
| 12. Nomenclatura | 68 |
| 13. Referencias Bibliográficas | 70 |
| Apéndice A (Gráficas) | 73 |
| Apéndice B (Programa de Computadora) | 104 |

1. INTRODUCCION

Si bien existe una cantidad considerable de literatura acerca de la distribución del flujo de una corriente principal en varias corrientes, así como de la formación de una corriente principal - simple a partir de varias, toda esta información disponible, aún no ha sido organizada de manera sistemática y en una forma aceptablemente comprensible. Como consecuencia de lo anterior, a menudo hay una gran incertidumbre en cuanto a la elección del método lógico para abordar un problema de diseño de cabezales, ya sean de distribución o de colección.

El problema de la distribución de un fluido es más viejo que la industria química, y los trabajos de investigación en mecánica de fluidos se remontan a la época de Bernoulli. Por esta razón, en la literatura se tiene disponible una gran cantidad de procedimientos de cálculo para resolver algunos problemas de distribución de fluidos. De hecho, se han gastado muchos esfuerzos en esta dirección y como consecuencia, se han publicado varios artículos excelentes. No obstante ésto, el campo de la distribución de un fluido es tan extenso y la mecánica del flujo tan compleja, que únicamente se ha cubierto un pequeño porcentaje de muchas facetas. Consecuentemente, la información disponible en relación a técnicas y procedimientos de diseño para obtener una apropiada distribución de fluido, es insuficiente en muchos de los casos encontrados en la práctica de la Ingeniería.

La mayor parte de los investigadores del tema se han dedicado a analizar sistemas particulares, los cuales se encuentran dentro de condiciones con rangos muy estrechos de operación. Por lo tanto, las correlaciones empíricas obtenidas en cada uno de estos programas experimentales, se ven obstaculizadas en su aplicación por limitaciones muy serias. La generalización o extrapolación de estos datos es difícil, y muy a menudo ésto da lugar a conclusiones conflictivas en relación con la información provista por otros investigadores.

La Industria Química se ha vuelto altamente competitiva y está demandando refinamientos que nunca antes se requirieron, en cuanto se refiere a la distribución de fluidos. Esta demanda, refleja el reconocimiento de que dichos refinamientos dan lugar a -- procesos más económicos.

Sin embargo, pronto surge la pregunta acerca del grado de refinamiento en la distribución de un fluido; la cual, únicamente -- puede ser contestada por y para casos particulares más que por medio de una declaración o informe generalizado. Naturalmente, en forma ideal a nosotros nos gustaría tener un perfil de distribución en ausencia de cualquier gradiente. La realización de este trabajo idealizado, está influenciada por limitaciones mecánicas e hidrodinámicas aunadas a las esenciales consideraciones económicas.

La distribución uniforme de un fluido, muy a menudo es esencial para la operación del equipo de procesamiento químico tal como cambiadores de calor tubulares, quemadores, reactores tubulares, sobre calentadores en hornos, etc. Lo anterior puede ser posible, si -- puede mantenerse constante la presión del fluido en todo el canal principal de distribución. Si no sucede esto, cada una de las conexiones de rama lateral se tendrá que equipar con una válvula de control, la cual permitirá que se hagan compensaciones en el flujo a fin de contrarrestar las variaciones de presión; que a su vez -- causarán variaciones en la velocidad de flujo a través de ramas laterales idénticas, dando lugar así a que se tenga un flujo preferencial indeseable en alguna zona particular del equipo.

Para obtener una distribución óptima, se debe disponer de una consideración apropiada acerca del comportamiento del fluido en el cabezal de distribución, así como de las condiciones de flujo corriente arriba y corriente abajo de dicho distribuidor. El diseño del distribuidor, puede fracasar debido a que no se tomó en -- cuenta el mecanismo de flujo corriente arriba o a que éste no se entendió completamente; y naturalmente, un distribuidor excelente se puede volver inefectivo a causa de las condiciones corriente abajo.

La distribución de flujo, se puede hacer razonablemente uniforme cuando existe un balance apropiado entre las energías cinética y potencial y el momentum de la corriente de entrada y las pérdidas por fricción a lo largo de la longitud del distribuidor y finalmente la caída de presión a través de las aberturas y líneas laterales. Cuando en un cabezal de distribución predominan la energía cinética y la fuerza de momentum de la corriente de entrada, se descargarán cantidades crecientes de fluido a medida que éste viaja hacia el extremo cerrado del cabezal.

Cuando predominan las pérdidas por fricción a lo largo del distribuidor, se distribuirán cantidades decrecientes de fluido a medida que éste viaja hacia el extremo cerrado del cabezal. Se puede tener un disturbio de flujo corriente arriba, tal como el producido por una válvula o un codo, superimponiendo una energía cinética y fuerza de momentum predominantes en la corriente de entrada. Con lo anterior, se provoca que el flujo de las ramas cercanas al punto de disturbio, se más grande que el de la zona media del cabezal.

La figura 1. ilustra los diferentes patrones de distribución mencionados arriba:

- A.- Muestra la distribución ideal a lo largo de la longitud de la unidad; ilustrando ésto, con flechas de velocidad de descarga de igual altura.
- B.- Representa el caso de cuando predominan el momentum y la energía cinética.
- C.- Ilustra cuando tenemos al término de fricción como predominante.
- D.- Ejemplifica una combinación entre el primer o segundo caso con condiciones de flujo corriente arriba alteradas - desfavorablemente.

La tendencia en la Industria Química, es hacia admitir la conveniencia de diseños de cabezales que suministren una distribución esencialmente uniforme. La distribución uniforme, deberá obtenerse a bases óptimas de diseño, manteniendo la inversión original (da

da por tamaño de equipo) y el costo de operación (tales como los requerimientos de potencia) en un mínimo.

Muchos autores han indicado previamente que se puede mantener una presión aproximadamente uniforme en un cabezal de distribución múltiple si se varía el área de la sección transversal del mismo; en tal razón que, la velocidad del fluido puede permanecer aproximadamente constante a medida que disminuye el gasto másico de flujo. Naturalmente, tal diseño trabajaría bien únicamente a un gasto dado. Por ejemplo, si se cambia el gasto de flujo al que se diseñó, puede modificarse el balance de fuerzas friccionales y de momentum dando lugar muy posiblemente a que se presente una distribución mala de flujo.

Con frecuencia el diseñador puede establecer limitantes; tales como la maldistribución de flujo o las pérdidas de presión permitibles. El trabajo presente, intenta describir un método unidimensional para optimizar diseños dentro de las limitantes anteriores y considerando únicamente cabezales simples de sección transversal continua; donde el fluido Newtoniano entra o deja el cabezal en el extremo abierto y en cada uno de los casos el cabezal se determina en el extremo cerrado. Dicho cabezal, está provisto de tubos o ramas laterales (del mismo tamaño y diámetro), unidos a éste a ángulos rectos y dispuestos igualmente espaciados.

2. TEORIA.

Existen dos influencias principales en la presión de un fluido que circula en un cabezal:

- a) Efectos de momentum.
- b) Efectos friccionales.

El momentum del fluido en un cabezal de descarga, tiende a producir una elevación en la cabeza estática (piezométrica) debido a la desaceleración de una parte del fluido; la cual cambia de dirección para fluir en la rama lateral. En un cabezal de colección, los efectos de momentum influyen en la dirección opuesta; la presión estática tiende a ser más grande en el extremo cerrado del cabezal y disminuye hacia el extremo abierto a medida que el flujo se acelera en cada una de las ramas laterales, que en este caso constituyen una alimentación.

El esfuerzo cortante de la pared o fricción, causa una caída de presión estática en la dirección del flujo en ambos tipos de cabezal (distribución o colección). Este efecto se puede predecir con aproximación razonable según los datos existentes en la literatura. En el cabezal de descarga, los efectos de momentum y fricción trabajan en direcciones opuestas; mientras que en el de colección dichos efectos se refuerzan.

La solución teórica para el caso especial de ramificación bidimensional de flujo, usando la teoría clásica de líneas de corriente libres de Helmholtz-Kirchhoff (13); daría características de flujo que permitirían obtener relaciones de presión-velocidad en una unión T simple. Cuando se usan los resultados obtenidos de la forma anterior para predecir características de flujo en fluidos reales, existen numerosas incertidumbres en su aplicación. Parece ser, que cuando se usa el mismo método aplicado a cabezales de colección, se obtienen resultados aún menos confiables. Se puede concluir que en la actualidad, únicamente una cantidad muy pequeña de análisis teórico es válida dentro de rangos considerables de las variables significativas y que además pueda tener aplicación general como referencia para

la comparación y evaluación de medidas de laboratorio.

Por las razones anteriores, los métodos presentados en las siguientes secciones de este trabajo, se usan para poner en claro y explicar los cambios de momentum.

2.1 DISTRIBUCION DE FLUJO.

2.1.1 CAMBIOS DE MOMENTUM A TRAVES DE UNA UNION "T" SIMPLE.

Para describir la situación de la división de flujo según se muestra en la figura 2; podemos aplicar directamente las formas simplificadas de las ecuaciones convencionales de momentum y de energía macroscópica.

Aquí se asume, que la velocidad media promedio en cada una de las secciones de la frontera es representativa del flujo en esa sección, y que el fluido que se separa a través de la rama lateral, ha perdido totalmente la componente axial de su velocidad antes de cruzar la superficie de control. Si se asume que la velocidad es proporcional a la potencia 1/7 de la distancia a la pared, tenemos la siguiente relación de velocidad:

$$(v^2)_{prom} / v_{prom} = 1.02 v_{prom}$$

Aquí haremos uso de un perfil plano de velocidades tal que:

$$(v^2)_{prom} / v_{prom} = v_{prom} = v$$

El incremento de presión para el flujo que continúa en el cabezal después de pasar la unión "T", se relaciona a la disminución de velocidad según la ecuación:

$$p_D - p_U = \frac{\rho}{\gamma_c} (v_U^2 - v_D^2) \quad (1)$$

Donde:

- P_D = presión estática en la sección corriente abajo ($\bar{l}b/ft^2$)
 P_U = presión estática en la sección corriente arriba ($\bar{l}b/ft^2$)
 V_U = Velocidad en la parte del cabezal corriente arriba de la rama lateral. (ft/seg)
 V_D = Velocidad en el cabezal corriente abajo de la rama lateral. (ft/seg)

Las observaciones experimentales han revelado, que el incremento de presión usualmente difiere del valor calculado según la ecuación presentada anteriormente. La discrepancia de valores se explica según la hipótesis de que la dirección de la corriente que continúa en el cabezal, no es exactamente normal a la abertura de la rama lateral y que la descarga lateral viene de una región de velocidad de flujo baja, en la cual la energía cinética es menor que el promedio (17) relativo al flujo remanente.

Así pues para balancear la ecuación se introduce un factor de corrección de momentum (k_D), el cual generalmente es menor que la unidad. Como consecuencia de lo anterior, la ecuación (1) deberá ser modificada a:

$$p_D - p_U = \Delta p = \frac{k_D \rho}{\gamma_c} (v_U^2 - v_D^2) \quad (2)$$

No obstante que k_D podría ser estimado teóricamente a través del cálculo de la dirección de las líneas de corriente en el flujo en la vecindad de la abertura de la rama lateral; un curso de acción más seguro, es determinar su valor a partir de cambios de presión observados experimentalmente (1, 2, 3, 5, 7, 12, 13, 22). La figura 3, muestra gráficamente los resultados de algunas de estas pruebas desarrolladas durante las cuatro décadas pasadas. En la referencia 29, se encuentran algunos resultados experimentales adicionales.

Las pruebas anteriormente mencionadas, se llevaron a cabo en uniones T de esquinas tanto afiladas como redondeadas y además en conexiones T soldadas; en las cuales el flujo de la rama lateral tuvo que pasar a través de un diámetro más pequeño que el existente

en la unión con la pared del cabezal. La evidente dispersión entre los puntos de la figura 3, sobre todo en la región de flujos pequeños en la rama lateral, se puede atribuir en parte, a las fallas en las técnicas de medida y cálculo y a las diferencias de geometría en los equipos usados para dichas pruebas.

Un factor adicional muy importante que contribuye a esa -- dispersión de los datos, es que se usó el cuadrado de la velocidad promedio en los cálculos de momentum, sin tomar en cuenta -- los ajustes necesarios para balancear el efecto de las variaciones de velocidad a través de las secciones. Para conexiones de rama lateral relativamente pequeñas, la velocidad del fluido que descarga en dicha rama en cierto modo está abajo de la promedio; ya que las bajas velocidades se presentan cerca de la pared y también debido a que se requiere menos fuerza para desviar un fluido más lento. La suposición anterior se ve respaldada por el hecho de que para una relación de descarga dada W_B/W_U , entre más grande sea el diámetro de la rama lateral, más grande es el área transversal en la cual la rama puede tomar su flujo de la región de velocidades abajo de la promedio. Así pues según se muestra en la fig. 3.

La ganancia aparente de energía potencial es lo más grande para una rama con $D_B/D_U = 1.0$, y disminuye a medida que se reduce D_B .

Desafortunadamente la peor divergencia entre los datos de la figura 3, se sucede en las relaciones de diámetro de rama a cabezal más grandes y a pequeños flujos en la línea secundaria. En caso contrario lo anterior sería muy representativo y útil para muchas aplicaciones; entre otras, para flujos en cabezales de cambiadores de calor enfriados por aire, cabezales en sobrecalentadores, etc.

Según indican las curvas de la figura 3, los valores del coeficiente de corrección de momentum para cabezales de distribución, varían desde aproximadamente 1.0 para flujos muy pequeños en la línea secundaria hasta cerca de 0.3 para flujos predominantemente en dicha rama lateral; indicando ésto que la ganancia en cabeza de presión para este caso es significativamente

grande. Se puede demostrar, que esta ganancia en cabeza de presión siempre es menor que la mitad de la que se presenta en una expansión repentina.

2.1.2 COEFICIENTES DE PERDIDA EN CORRIENTES LATERALES:

La figura 4, muestra los valores graficados de los coeficientes de contracción (C_{od}) obtenidos teóricamente para una división de flujo en una rama lateral. Las pérdidas de energía resultantes, se tomaron que sean como las que se presentan en una expansión brusca corriente abajo de la sección marcada V_c en la figura 5^a; donde la contracción del flujo deberá asumirse esencialmente completa.

Por esta razón, el término de pérdida de presión en una línea secundaria se determinó según la fórmula de Borda-Carnot para pérdidas en un ensanchamiento súbito:

$$\Delta p = \frac{\rho (V_{Vc} - V_B)^2}{2gc} \quad (3)$$

Lo cual es exacto, para agua en flujo turbulento y aplica bastante bien a flujo turbulento de gases y vapores con velocidades superiores a 200 ft/seg (16). (V_{vc} es la velocidad promedio en la vena contracta).

La comparación entre las pérdidas de cabeza calculadas para el flujo que se desvía del cabezal a la línea secundaria, con la cabeza de velocidad de flujo en la rama misma; da como resultado el coeficiente de pérdida K_D , donde:

$$K_D = \frac{H_{B-D}}{\frac{V_B^2}{2g}} = \left(\frac{1}{C_{od}} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

Donde:

H_{B-D} = diferencia de cabeza estática entre la rama lateral y el conducto corriente abajo de dicha línea secundaria. (ft)

V_B = Velocidad en la rama lateral. (ft/seg)

La figura 6 muestra una gráfica de coeficientes medidos experimentalmente, junto con los valores comparables de de coeficientes de pérdida obtenidos por derivación teórica; lo cual se muestra por líneas continuas.

Según observación, nos percatamos de que hay una concordancia razonable entre los resultados teóricos y experimentales; excepto para $D_B / D_U = 1$ y $V_B / V_U > 0.6$ en donde ocurren diferencias significativas. Es muy difícil justificar estas diferencias debido a las varias suposiciones implícitas en los cálculos.

2.2 COLECCION DE FLUJO:

2.2.1 CAMBIOS DE MOMENTUM A TRAVES DE UNA UNION "T" SIMPLE:

En la figura 5b se ilustran por medio de flechas los patrones de flujo según las visualiza el diseñador; además se muestra el efecto de la contracción seguido por una expansión en la tubería principal. De nuevo encontramos que debido a tal fenómeno, las ecuaciones de momentum a través de la rama a-bierta y para el lado de la unión de flujo en el cabezal re-quieren factores de corrección.

Como consecuencia de lo anterior, la ecuación para combinación de flujo (1) se modifica al introducir un factor de corrección de momentum; obteniéndose así la siguiente ecuación:

$$(p_b - p_u) = \Delta p = \frac{k_c \rho}{\gamma_c} (v_u^2 - v_b^2) \quad (5)$$

A partir de la ecuación (5), se puede determinar la disminución de presión estática a través de la unión "T" para el caso de combinación de flujo.

En la figura 8, se muestran graficados los resultados experimentales para el factor de corrección de momentum. Las pérdenes indicadas varían de aproximadamente 1.4 a 2.5 veces

la cabeza de velocidad corriente abajo; además, las pérdidas más grandes se presentan para la relación de diámetros más pequeña probada experimentalmente.

2.2.2 COEFICIENTES DE PERDIDA EN CORRIENTES LATERALES.

Para representar la pérdida de cabeza que ocurre en el flujo de la rama lateral que se vuelca en el cabezal, en la figura 9 se muestran los valores del coeficiente de pérdidas en corriente lateral (K_C) para tres relaciones de diámetro de línea secundaria a diámetro de cabezal, donde:

$$K_C = \frac{H_{B-D}}{\frac{V_B^2}{2g}} \quad (6)$$

Se recalca que en la referencia (29), se encuentra información adicional acerca de más datos experimentales de dichos coeficientes.

Cuando tenemos flujos pequeños en el tubo lateral, se presentan pérdidas negativas o sea hay una ganancia aparente en energía. Lo anterior se puede explicar lógicamente para el caso limitante de $W_B / W_D = 0$; ya que aquí la presión en la línea secundaria es igual a la que se tiene en la unión con el cabezal y además la velocidad es cero. Así pues, se tiene una ganancia de energía para flujos muy pequeños en la línea secundaria. Dicha ganancia es también aparente, a medida que el fluido va de la rama lateral a una región del flujo principal en donde la velocidad local esté abajo de la promedio.

A medida que W_B / W_D tiende a cero, cada una de las curvas de K_C se acerca a un valor de

$$H_{B-D} = - \frac{V_D^2}{2g}$$

2.2.3 NOTA PARA COEFICIENTES DE MOMENTUM Y PERDIDAS EN CORRIENTES
LATERALES PARA COLECCION Y DISTRIBUCION DE FLUJO:

Los resultados mostrados en las figuras 3, 6, 8 y 19, fue
ron tomados principalmente del trabajo de McNown (5); quien re
copiló y valoró esencialmente todos los datos referentes al te
ma y que se encontraban disponibles hasta 1953.

3. EFECTOS DE LAS RAMAS ADYACENTES.

Se debe enfatizar que, si bien los resultados de prueba en una unión simple usualmente son suficientes para definir las características de un sistema completo de distribución múltiple; es necesario sin embargo, valorar el efecto que se presenta al tener ramas sucesivas y entre las cuales existe una distancia relativamente corta corriente abajo. Si vamos a determinar la variación de presión en un cabezal de descarga, por medio de aplicaciones sucesivas de la ecuación (2) y con correcciones como las presentadas en la figura 3, y además presuponiendo el conocimiento de las características de la resistencia a la fricción entre las líneas secundarias; debemos tener algún conocimiento de la magnitud de la interacción ó de la separación mínima entre ramas sucesivas que no causará efectos significativos.

Se han llevado a cabo medidas experimentales (20) para espaciamientos entre ramas adyacentes de 4, 8 y 14 veces el diámetro del cabezal; pero dichas medidas no estuvieron bien definidas y únicamente se obtuvieron datos útiles de los valores promedio de los muchos de los resultados de prueba (15). Las conclusiones de esta experimentación fueron que: la recuperación de presión estática aquí, es menor que la que se obtiene por medio del factor k_D tomado de la figura 3 y de acuerdo a los siguientes porcentajes:

15% menor para el espaciamiento de 4 diámetros, 10% para el espaciamiento de 8 diámetros y menos de 5% para el de 14 diámetros. Estos valores variaron considerablemente con la relación de descarga. Probablemente, no ocurriría ninguna interacción significativa si el espaciamiento entre las líneas adyacentes fuera de 20 diámetros de cabezal o más.

Hasta la fecha, no ha sido posible evaluar totalmente el efecto de interacción de las ramas adyacentes en la combinación de flujos.

Relativo a la interacción con las corrientes de entrada o salida de los cabezales, se deberán hacer consideraciones para

el caso de que las líneas de alimentación sean parecidas a las secundarias.

Los niveles de presión estática local en tales tuberías de entrada deberían ser más altos que a lo largo del cabezal; además; al ser la tubería de entrada perpendicular a la rama de descarga más cercana la presión debería ser más baja. Desafortunadamente todo lo anterior aún no se puede predecir con precisión aceptable.

Se puede reducir tal efecto de entrada, al mover la primera conexión de línea secundaria al menos 5 diámetros de cabezal lejos de la entrada del fluido al cabezal. Así mismo, los diámetros del cabezal y de la línea secundaria deberán ajustarse de tal manera que una variación de una ó dos cabezas de velocidad en la presión estática, no influya en grado considerable la distribución de flujo.

También se han determinado algunas características en sistemas con líneas laterales dobles (5) tomando como referencia para ello una serie de pruebas en un cabezal con un par de ramas colocadas simétricamente. Las elevaciones de presión medidas en dicho cabezal a cantidades de flujo inferiores a $2W_B/W_U = 0.25$ coinciden con los resultados para una unión "T" simple cuando se hace uso de un diámetro equivalente para el área de la rama doble (Ver figura 10). Para valores de la relación de descarga entre 0.25 y 0.75, se encontró una recuperación más grande para lateral doble; lo cual se debió presumiblemente a la mayor oportunidad que tiene el fluido que se mueve a bajas velocidades de fluir en una u otra de las líneas secundarias. Para relaciones que exceden a 0.75, los valores observados disminuyen rápida e inesperadamente a medida que incrementamos la relación de descarga. A grandes valores de W_B/W_U , el flujo fué muy inestable y se tuvieron cambios rápidos y periódicos en la división de flujo, causando con ello pérdidas excesivas. Únicamente cuando se colocó una placa de división entre las dos ramas se tuvieron resultados acordes y se pudo continuar la línea sólida de la figura 10. Con lo anterior, se estableció

una división de flujo igual y estable y con ello la elevación de presión se convirtió esencialmente en la predicha por las pruebas en ramas laterales simples.

4. PERDIDAS PARA EL FLUJO EN RAMAS INCLINADAS.

Vazsonyi (4) presentó las siguientes ecuaciones; las cuales están basadas en el trabajo de investigadores previos. Para una tubería recta que se divide en dos ramas (Ver figura 11), el cambio de cabeza a través del sistema está dado por la ecuación:

$$2g H_{U-D} = \lambda_1 v_u^2 + (2\lambda_1 - \lambda_2) v_B^2 - 2\lambda_2 v_u v_B \cos \alpha' \quad (7)$$

Donde λ_1, λ_2 y α' son funciones de un factor α dado en las figuras 12 y 13.

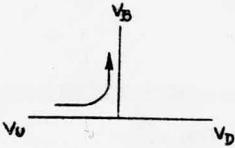
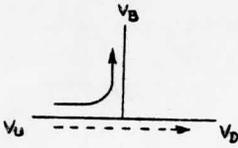
Para dos líneas secundarias rectas que se combinan en una tubería principal (Ver figura 14), el cambio de cabeza a lo largo del sistema está dado por la ecuación:

$$2g H_{B-D} = \lambda_3 v_B^2 + v_D^2 - 2v_D \left(\frac{v_B w_B}{w_D} \cos \beta' + \frac{v_u w_u}{w_D} \cos \delta' \right) \quad (8)$$

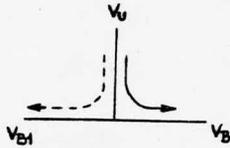
Donde λ_3 es una función de β que se da en la figura 15; β' y δ' son funciones de β y δ de la figura 13.

Se hace notar que el tema de pérdidas de flujo en ramas inclinadas, se discute con detalle en las referencias (30) y (31) de reciente publicación.

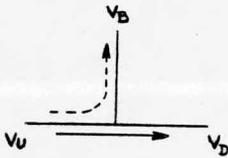
Cuando combinamos las ecuaciones (7) y (8) con la ecuación (1) y usamos las constantes apropiadas de las figuras 12, 13 y 15 para un ángulo de rama de 90° , se pueden derivar fórmulas para líneas secundarias del tipo de codo o de unión "T" común. Además, si incluimos un factor de 1.25 en dichas fórmulas para considerar los efectos de entrada o salida para el caso de ramas colocadas muy próximamente, se obtiene una serie de ecuaciones de trabajo que se resumen enseguida:



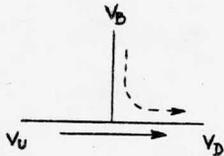
$$\Delta p_{U-D} = \frac{e}{51.4} \left(1.8 V_B^2 - 0.368 V_U V_B \right)$$



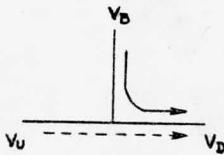
$$\Delta p_{U-D} = \frac{e}{51.4} \left(1.2 V_B^2 \right)$$



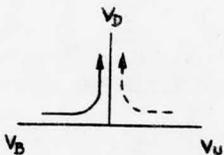
$$\Delta p_{U-D} = \frac{e}{51.4} \left(1.36 V_D^2 - 0.64 V_U^2 - 0.72 V_U V_D \right)$$



$$\Delta p_{U-D} = \frac{e}{51.4} \left\{ 2V_D^2 - 0.05 V_U^2 - 2V_D \left(0.205 V_B \frac{W_B}{W_D} + V_U \frac{W_U}{W_D} \right) \right\}$$



$$\Delta p_{B-D} = \frac{e}{51.4} \left\{ 2V_D^2 - 0.4 V_B^2 - 2V_D \left(0.205 V_B \frac{W_B}{W_D} + V_U \frac{W_U}{W_D} \right) \right\}$$



$$\Delta p_{B-D} = \frac{e}{51.4} \left\{ 2V_D^2 - 0.4 V_B^2 - 0.41 V_D \left(V_B \frac{W_B}{W_D} + V_U \frac{W_U}{W_D} \right) \right\}$$

Las fórmulas anteriores se aplican para la caída de presión en la trayectoria mostrada por las líneas continuas en los esquemas; las unidades son $\overline{\text{lb}}/\text{ft}^2$. En estas ecuaciones, un resultado positivo representa una pérdida de presión y uno negativo, recuperación de presión. Las ecuaciones anteriores únicamente son útiles para cabezales que tengan entre 5 y 15 conexiones de rama secundaria o lateral.

5. ECUACIONES PARA CABEZALES DE DISTRIBUCION.

En la figura 16 se muestra un esquema con nomenclatura para un cabezal de descarga; el cual consiste de un número finito de secciones sencillas (rectas) separadas por un número igual de conexiones de línea secundaria. Dichas ramas laterales son uniformes en tamaño y se encuentran igualmente espaciadas. Así mismo, se muestran esquemáticamente los niveles de presión tanto para las ramas laterales como para el cabezal, extendiendo las líneas de presión hasta los puntos centrales de las líneas secundarias para mayor claridad.

A continuación se dan ecuaciones para determinar fricción en el cabezal, descarga en la rama y cambios de momentum. Estas ecuaciones se pueden resolver para obtener las cantidades de flujo en la línea secundaria y la presión y velocidad corriente abajo en la misma; teniendo únicamente como datos las condiciones de velocidad y presión a la entrada del cabezal y la presión a la salida de las ramas.

Para las pérdidas de presión por fricción en una sección elemental Δx de la entrada del cabezal, podemos aplicar la ecuación de Fanning según:

$$p_u - p_o = - \frac{2e}{g_c} f_o \frac{v_o^2}{D} \Delta x \quad (9)$$

En cuanto a la selección del factor de fricción (f_o) se hace notar que según datos disponibles (14), el factor de fricción tanto para flujos compresibles como para incompresibles sigue o es la misma función del número de Reynolds. Ya que para flujo compresible adiabático los números de Reynolds usualmente son altos en el régimen turbulento, la variación del factor de fricción con respecto a la temperatura a lo largo de la tubería es pequeña y en consecuencia, en los cálculos

se puede hacer uso de los mismos valores de factor de fricción ajustados únicamente por los efectos debidos a las variaciones de velocidad a lo largo del cabezal.

Las ecuaciones y datos presentados en este trabajo se aplican al flujo de fluidos incompresibles; tales como líquidos, gases y vapores que presenten cambios de densidad menores del 10% y velocidades menores de 200 ft/seg. (Sujetándonos a las condiciones anteriores, en caso de que usáramos la densidad del fluido a la entrada de la tubería para determinar la caída de presión en la misma, el error que resultara al hacer dicha consideración generalmente no excedería los límites de incertidumbre que se tienen para el factor de fricción.).

Se hace notar que al final de la sección elemental se tiene una conexión para rama de salida, y que además se tienen presentes discontinuidades en cuanto a presión y velocidad. Los cambios producidos por los factores anteriores, se pueden calcular a partir de balances de materia y de momentum.

Para determinar la cantidad de flujo a través de la línea secundaria se establece un balance de materia, en donde se hace uso de la media aritmética de las presiones corriente arriba y corriente abajo de la abertura de la rama conjuntamente con la ecuación para una placa de orificio según:

$$V_D - V_U = -\frac{4\alpha C}{D} \Delta x \sqrt{\frac{2g_c}{e_f} \left(\frac{p_U + p_D}{2} - p_B \right)} \quad (10)$$

Donde:

α = Fracción del área interna del cabezal que está ocupada por la abertura de la conexión de la rama lateral.

C = Coeficiente de descarga apropiado para el orificio.

Muchos autores han usado con buenos resultados coeficientes de descarga que van de 0.6 a 0.63, lo cual representa aproximadamente pérdidas de $2\frac{1}{2}$ cabezas de velocidad.

La suposición anterior, constituye el punto débil del método para la determinación de las curvas de gradientes de presión y de distribución de flujo. La caída de presión a través de un orificio generalmente es, mayor (en uno o dos órdenes de magnitud) que los términos de energía cinética, momentum o fricción en el cabezal mismo; de lo cual se puede deducir que un error pequeño en el coeficiente del orificio produce alteraciones bastante fuertes, y de ahí que dicho coeficiente sea de importancia vital. El coeficiente de descarga es una función de la relación de tamaño de la abertura para la línea secundaria a diámetro del cabezal, de la forma de dicha abertura, de la presión corriente arriba y del régimen y gasto de flujo a través de la abertura. Para evaluar dicho coeficiente se cuenta con datos experimentales (Ver figuras 6 y 9); pero éstos presentan un rango de validez muy restringido y en consecuencia, no se pueden aplicar en una forma directa y sencilla al diseño inicial de cabezales. Así pues, para poder determinar el valor exacto del coeficiente de descarga como una función de todas las variables arriba mencionadas, es necesario contar con una cantidad de datos experimentales más extensa y variada. Se ha demostrado(16), que si la componente normal a la pared del cabezal de la velocidad a lo largo del cabezal, el efecto que presenta ésta última en el coeficiente de descarga es muy pequeño.

En la ecuación (10), α (la fracción de área interna del cabezal que se ocupa para la conexión de la línea secundaria) está dada por:

$$\alpha = \frac{d^2}{4D\Delta x} = \frac{nd^2}{4DL}$$

Donde n es el número de puntos en los que se coloca una rama lateral.

La tercera ecuación que nos es útil, está basada en el balance de momentum:

$$p_D - p_U = \frac{k_D}{g_c} e (v_U^2 - v_D^2) \quad (11)$$

Así pues, las ecuaciones (9), (10) y (11) son las básicas para interpretar una sección elemental de un cabezal de descarga que contiene una sola conexión de rama lateral. Según se mencionó previamente, dichos cabezales se pueden resolver a menos que se conozcan las condiciones de velocidad y presión a la entrada del cabezal y la presión a la que descargan las líneas secundarias.

La solución se puede simplificar considerablemente si agrupamos algunas de las variables dependientes e independientes en parámetros adimensionales, según:

$$y = \frac{5.64 \alpha C}{D} \Delta x = \frac{1.41 C d^2}{D^2} \quad (12)$$

$$P_o = \frac{(p_o - p_B) q_c}{2 e v_o^2} \quad (13)$$

$$F_D = \frac{F_o}{2^{5/2} \alpha C} \quad (14)$$

$$V_D = \frac{v_D}{v_o} \quad (15)$$

Donde p_B es la presión externa uniforme a la descarga de los orificios, los cuales constituyen las ramas secundarias.

Assumiendo que el factor de fricción varía con la velocidad del fluido de acuerdo a la relación generalmente aceptada para tubos lisos se puede tener:

$$F_D = F_o V_D^{-1/4} \quad (16)$$

Por lo tanto, las ecuaciones básicas serán:

$$p_u - p_o = -F_o V_o^2 y \quad p_u - p_D = -F_o V_D^{7/4} y \quad (17)$$

Además para la primera y las siguientes secciones:

$$V_D - V_u = -y \sqrt{p_u - p_D} \quad (18)$$

y finalmente:

$$p_D - p_u = \frac{k_D}{2} (V_u^2 - V_D^2) \quad (19)$$

Después de éstos arreglos, se puede resolver el problema en términos de únicamente tres parámetros adimensionales: p_o , F_o y y ; donde p_o está relacionada a la presión y al momentum del fluido en el extremo abierto del cabezal; F_o a la fricción en la sección recta de entrada al cabezal y "y" a la distancia entre las conexiones de ramas adyacentes. Por definición: $V_o = V_u = 1$ a la entrada al cabezal y en la primera sección. Para obtener una expresión para V_D podemos combinar las ecuaciones (18) y (19) según:

$$V_D = -\frac{1}{1 + \frac{y^2 k_D}{2}} \left\{ V_u - \sqrt{\frac{y^4 k_D^2}{4} V_u^2 + 2 p_u^2 \left(1 + \frac{y^2 k_D}{2}\right)} \right\} \quad (20)$$

Para la rutina de cálculo, las condiciones de entrada al cabezal se substituirán, sección por sección, por las condiciones corriente abajo de la línea secundaria. En la sección 7 se dan resultados numéricos para un cabezal de distribución en términos de los tres parámetros anteriores.

6. ECUACIONES PARA CABEZALES DE COLECCION:

En la figura 17 se muestra un esquema de un cabezal de colección, constituido por un número finito (tres) de secciones rectas separadas por igual número de conexiones de línea secundaria; las cuales son uniformes en tamaño y en espaciamiento. En el diagrama se muestran esquemáticamente los niveles de presión tanto para las ramas como para el cabezal. (Las líneas de presión se encuentran extendidas hacia el centro de la rama).

Los detalles de las derivaciones matemáticas para obtener las expresiones necesarias para el cálculo son esencialmente los mismos que los que se realizaron para los cabezales de distribución. Las ecuaciones para los cabezales de colección difieren de las relaciones correspondientes para los cabezales de descarga por dos razones: El fluido aquí, fluye de las ramas hacia el conducto principal, y ya que la distancia a lo largo del cabezal se mide a partir de su extremo abierto; la dirección de incremento de longitud será opuesta a la del flujo del fluido.

Comenzando los cálculos en dicho extremo abierto se encuentra que:

$$p_D - p_0 = -F_0 V_0^2 y \quad p_{D1} - p_U = -F_0 V_U^{3/4} y \quad (21)$$

Las expresiones anteriores son las ecuaciones reagrupadas de Fanning para la primera y subsecuentes secciones, y:

$$V_U - V_D = -y \sqrt{p_U + p_D} \quad (22)$$

y

$$p_U - p_D = -\frac{k_c}{2} (V_D^2 - V_U^2) \quad (23)$$

Es importante observar que:

$$p_0 = \frac{(p_D - p_0) g_c}{2 \rho V_0^2} \quad (24)$$

en donde se usan los diferenciales de presión entre el cabezal y la línea secundaria en forma similar como se hizo en la ecuación (13). La nomenclatura es similar a la que se tiene para los cabezales de distribución. De nuevo, para obtener una expresión V_u Combinamos las ecuaciones (22) y (23) según:

$$V_u = \frac{1}{1 - \frac{y^2 k_c}{2}} \left\{ V_D - \sqrt{\frac{y^4 k_c^2}{4} V_D + 2y^2 \rho_D \left(1 - \frac{y^2 k_c}{2}\right)} \right\} \quad (25)$$

Otra vez, por definición $V_0 = V_D = 1$ en el extremo abierto del cabezal. Para el cálculo paso a paso, las condiciones de entrada al cabezal serán sustituidas sección por sección por las condiciones corriente arriba presentes en la rama lateral.

En la sección 7 se dan resultados numéricos para cabezales de colección.

7. CALCULO DE DISTRIBUCIONES DE FLUJO DE CABEZALES:

Las ecuaciones presentadas en las secciones 5 y 6 se aplican satisfactoriamente para la estimación y para la mayoría de los propósitos de diseño de cabezales. En los proyectos en donde son esenciales resultados más precisos, se puede estudiar en el laboratorio una unión típica o un acoplamiento de uniones; de tal manera que los resultados obtenidos pueden ser usados para el diseño de un sistema completo de distribución o colección múltiple.

Las ecuaciones (17), (19) y (20) para cabezales de descarga y las ecuaciones (21), (23) y (24) para cabezales de colección, se pueden resolver por cálculos simples de paso a paso. En éste método se usarán los valores apropiados en los tres parámetros adimensionales P_o , F_o y " y ". Estos valores representan respectivamente las condiciones de flujo en el extremo abierto del cabezal, la primera selección de caída de presión en términos de energía cinética y las relaciones geométricas del cabezal. Así mismo, es necesario insertar los valores para los factores de corrección de momentum K_D ó K_C (Ver figuras 3 y 8) (K_D ó K_C) variable dependiente).

El procedimiento a seguir para el cálculo es como sigue: Determinar la primera sección incluyendo la primera conexión de línea secundaria, usando para ello los datos iniciales de proceso. Para calcular la siguiente sección, hacemos uso de los datos de presión y velocidad al final de la sección anterior; iterando en cada vez el factor de corrección de momentum. Encontrando los valores complementarios de F_o para un valor dado de pérdida de cabeza de velocidad, podemos conseguir un balance entre los efectos de fricción y de momentum, lo cual nos dará una distribución de flujo aproximadamente uniforme. Sin embargo, en la práctica, ningún par de valores de P_o y F_o proporciona una distribución perfectamente

uniforme. Esto es más notorio para el caso de un cabezal de colección.

Con objeto de ilustrar algunos patrones de distribución de flujo que se presentan en cabezales, en las figuras 18 a 31 se muestran 14 conjuntos de curvas típicas; las cuales se derivan de los resultados de cálculos en la computadora. Los valores usados de K_D y K_C se muestran con líneas discontinuas en las figuras 3 y 8. Aquí no se toma en cuenta la interferencia probable entre aberturas para conexión de una línea secundaria. La figura 18 contiene curvas de distribución de flujo para un cabezal caracterizado por ramas espaciadas a $y = 0.05$ y una pérdida de presión pequeña de 0.4 cabezas de velocidad; lo cual es representativo de un flujo a alta velocidad; en el punto de entrada.

Si el flujo de la primera rama es igual al flujo de la última, con $F_0 = 0.45$, en la parte media del cabezal se tendrá aproximadamente un -22% de maldistribución de flujo. En este cabezal es evidente la inestabilidad de la distribución de flujo, ya que si incrementamos en 10% el valor de F_0 (de 0.45 a 0.5), provocamos que el cabezal sea inoperante; mientras que si disminuimos F_0 en 10% (de 0.45 a 0.41) tendremos como resultado un + 50% de maldistribución.

Las figuras 19, 20, 21 y 24 muestran cabezales con pérdidas de presión cada vez mayores, lo cual nos indica que se tienen bajas velocidades en los cabezales y teniendo como resultado una distribución de flujo cada vez mejor. El diseñador, puede aprovechar algunas secciones de una curva de distribución dada, al variar las velocidades de entrada por medio de cambios en la sección transversal.

Las figuras 22, y 23 pueden servir para comparación de distribuciones de flujo en el mismo cabezal. La primera se calculó con K_D dependiente del flujo y la segunda con K_D constante. A modo de comparación, tenemos que en este cabezal de baja velocidad la distribución de flujo para los valores más

comunes de F_0 (entre 0.01 y 0.5), es de 7 a 10% con K_D dependiente del flujo y de 10 a 14% para el caso en donde K_D es constante; lo cual nos muestra una discrepancia notable. Lo anterior resalta la necesidad de seleccionar el valor correcto de K_D .

Las figuras 25 a 31 muestran curvas de distribución de flujo tomando las mismas características de pérdida presión-velocidad que se ilustraron antes para cabezales de recolección.

De nuevo el espaciamiento entre conexiones de rama es de $y = 0.05$. Comparando los pares de curvas con condiciones similares, se observa que la distribución de flujo es menos uniforme en los cabezales de colección que en los de distribución.

Al manejar la misma cantidad de fluido y con una maldistribución similar, nos encontramos con que los cabezales de recolección requieren una sección transversal más grande que los cabezales de distribución.

Para los cálculos anteriores se ha despreciado la influencia de la presión en la densidad del fluido. Cuando se considera la influencia de la expansión del fluido, parece ser que el tamaño requerido de los cabezales de colección es aún más grande que el que se indicó anteriormente.

Las figuras 32 y 33 muestran los resultados condensados y combinados, de los cálculos llevados a cabo en algunos grupos de cabezales de distribución y de descarga. En las fórmulas F y Y mostradas, se usaron los valores de 0.6 y 1.0 para el coeficiente de descarga en el orificio (C), para cabezales de descarga y colección respectivamente. Para los coeficientes de corrección por momentum, se usaron los valores mostrados en las figuras 3 y 8 despreciando la interferencia que se presenta - corriente abajo. Por medio de estas curvas (32 y 33), se puede obtener un estimado rápido de la maldistribución en la mayoría de los diseños de cabezales.

8. METODOS SIMPLIFICADOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE CABEZAL:

El dimensionamiento preciso de sistemas de distribución de flujo haciendo uso de las ecuaciones (12) a (25), es un proceso que consume mucho tiempo y que es innecesario en muchos casos. A continuación se describen métodos simplificados para dicho dimensionamiento; los cuales proporcionan una exactitud generalmente aceptable para la mayoría de las aplicaciones en ingeniería.

Se define la Maldistribución (Mal) como:

$$\text{Mal} = \left\{ \frac{\text{El mayor flujo a través de una rama}}{\text{El flujo más pequeño a través de una rama}} - 1 \right\} \times 100 \quad (26)$$

Inicialmente se asume que tenemos igualdad de flujo a través de cada una de las líneas secundarias, seguido lo cual podemos hacer uso de la ecuación (2) para determinar un balance aproximado de presión entre la primera y la última rama; tanto en el cabezal de entrada como en el de salida. Según se ilustra en las figuras 18 a 31, no siempre sucederá que las aberturas primera y última darán la maldistribución más grande; sin embargo generalmente éste será el caso cuando tratemos con equipo de proceso. Para este análisis se tomarán como adecuados los valores globales promedio de $k_D = 0.6$ y $k_C = 0.9$ para el factor de recuperación de momentum en cabezales de distribución y colección respectivamente.

La maldistribución en cabezales largos, además de los efectos de momentum se ve influenciada por los efectos de fricción. En el cálculo de cabezales, se puede hacer una distinción clara entre caída de presión y pérdidas por fricción.

La caída de presión únicamente puede representar una conversión de energía de presión a cualquier otra forma de energía; mientras las pérdidas por fricción representan una pérdida neta

en la energía-trabajo total disponible del fluido.

Cuando se determina la influencia de la fricción en la mal-distribución, suponemos que se tiene igual flujo a través de cada una de las ramas laterales, según lo cual la caída de presión friccional en el cabezal se puede estimar a partir de la velocidad de entrada (V_0), la longitud (L), el factor friccional en el extremo abierto del cabezal (f_0) y haciendo uso de la ecuación (9) modificada para la longitud total (L)

$$\Delta p_{f_0} = -\frac{ze}{g_c} f_0 \frac{V_0^2}{D} L \quad (26a)$$

Ya que se puede asumir que el factor de fricción es inversamente proporcional a la potencia $1/4$ de la velocidad y además que la velocidad del fluido cambia en cada una de las ramas, se presenta a continuación una tabla (tabla 2) en la cual se da un conjunto de factores de corrección para la caída de presión determinada según la ecuación (26a), a las condiciones de entrada (o salida). Esta tabla se usó para obtener las pérdidas por fricción en un cabezal con un número específico de líneas secundarias igualmente espaciadas.

En consecuencia:

$$\Delta p_m = C_f \Delta p_{f_0} \quad (27)$$

Según se puede observar en la tabla, la variación en el factor de fricción o en el número de aberturas laterales presenta un efecto relativamente poco importante en las pérdidas de presión estimadas inicialmente. La segunda columna de la Tabla 2 presenta factores de corrección para el caso de que se tenga un factor de fricción constante a lo largo del cabezal.

Haciendo uso de un factor de fricción asintótico de $1/3$ y de una combinación de las ecuaciones (2) y (27), se pueden derivar fórmulas de trabajo simplificadas que proporcionen una aproximación al cambio de presión (normalmente un incremento) que se tiene a lo largo de la longitud analizada de un cabezal de distribución de sección transversal uniforme. La ecuación que se obtiene para este caso es:

$$\Sigma \Delta p_d = \frac{e V_0^2}{2g_c} \left(1.2 - \frac{4f_0 L}{3D} \right) \quad (28)$$

y para un cabezal de colección de sección transversal uniforme, la disminución de presión a lo largo de la longitud analizada se obtiene según:

$$\sum \Delta p_c = - \frac{e v_o^2}{2g_c} \left(1.8 + \frac{4f_o L}{3D} \right) \quad (29)$$

TABLA 2

Factores de corrección para caída de presión friccional (C_f) (25)

| Número de ramas en la parte de cabezal analizada. | C_f cuando el factor de fricción es proporcional a $(N_{RE})^{-1/4}$ | C_f cuando el factor de fricción es cte. a lo largo del cabezal |
|---|--|---|
| 2 | 0.297 | 0.250 |
| 3 | 0.319 | 0.278 |
| 4 | 0.330 | 0.292 |
| 5 | 0.336 | 0.300 |
| 6 | 0.341 | 0.306 |
| 7 | 0.344 | 0.310 |
| 8 | 0.347 | 0.313 |
| ∞ | 0.364 | 0.333 |

Mediante la raíz cuadrada de la caída de presión a través de las trayectorias de flujo paralelas, obtenemos una medida aproximada del flujo en éstas. Por lo tanto, la ecuación (26) se puede re-escribir como:

$$Mal = \left(\sqrt{\frac{\sum \Delta p_{max}}{\sum \Delta p_{min}}} - 1 \right) \times 100 \quad (30)$$

Finalmente, se dan algunas recomendaciones para el primer estimado en un dimensionamiento de cabezales.

- (a) $\frac{\text{Area total de la abertura de la rama}}{\text{Area transversal del cabezal}} \leq 1.0$
- (b) $\frac{\text{Longitud del cabezal (L)}}{\text{Diámetro del cabezal (D)}} \leq 70.0$
- (c) Usar regimen a contra-corriente y una combinación de entrada y salida del cabezal en forma de "U" cuando:

$$\frac{2C_{ff}L}{k_d D} < 1.0$$

EJEMPLOS NUMERICOS:

En los siguientes ejemplos se ilustra la aplicación de algunos de los métodos y principios precedentes:

- A) Se van a distribuir 1000 lb/hr de vapor de agua a 5 psia en 16 partes a aproximadamente iguales haciendo uso para ello de un cabezal constituido de un conducto recto y de sección transversal cuadrada; al cual están soldados, a ángulos rectos 16 tubos de 1.5 pulgadas de diámetro interno. El cabezal tiene una longitud de 8 ft y los intervalos entre ramas adyacentes son de 6 pulgadas. Se considerará en principio un cabezal de sección transversal interna de 6' X 6' con un radio hidráulico de 1.5 pulgadas y un diámetro equivalente de $4 \times 1.5 = 6'$. El vapor entra en el extremo abierto del cabezal.

SOLUCION;

Velocidad del flujo
a la entrada:

$$v = \frac{1000 \times 73.52 \times 144}{3600 \times 36} = 81.7 \text{ ft/seg}$$

Número de Reynolds: $N_{RE} = \frac{6 \times 81.7 \times 0.01325 \times 10^4}{12 \times 0.012 \times 6.72} = 67 \text{ 000}$

Factor de fricción: $f = 0.0054$

Usando la figura 32: $\alpha = 0.0123$

$$F_{\text{prom}} = 0.130$$

$$Y_{\text{prom}} = 0.667$$

Maldistribución: $\text{Mal} \approx 16.5\%$ aproximadamente

Cambio de presión en el cabezal
(en cabezas de velocidad)

$$\frac{\Delta p}{\frac{c v_0^2}{2g_c}} = 3.6$$

Donde: $\frac{c v_0^2}{2g_c} = 1.415 \text{ lb/ft}^2$

Así pues, la caída de presión entre el punto de entrada al cabezal de distribución y la primera línea secundaria es:
 $1.415 \times 3.6 = 5.1 \text{ lb/ft}^2$

La prueba con otros diámetros arroja los resultados mostrados en la tabla siguiente (Estos resultados se usarán únicamente como una guía burda, ya que las relaciones de diámetros están fuera del rango de validez de 1:3 a 1:4 de la figura 32).

TABLA 3

Ejemplo numérico: Determinación de maldistribución y pérdidas de presión en varios cabezales de distribución.

| Sección transversal del cabezal. | F_{prom} | Y_{prom} | Mal. aprox. | Pérdida de presión en el cabezal (en cabezas de velocidad). | Caída de presión entre el punto de entrada al cabezal y la primera rama. |
|----------------------------------|------------|------------|-------------|---|--|
| | | | | $\frac{\Delta p}{\frac{ev_0^2}{2gc}}$ | $\Delta p \frac{D_b}{ft^2}$ |
| 9"x9" | 0.198 | 0.296 | 3 % | 26 | 7.25 |
| 8"x8" | 0.183 | 0.375 | 4 % | 14 | 6.25 |
| 7"x7" | 0.167 | 0.491 | 6 % | 7.2 | 5.47 |
| 6"x6" | 0.130 | 0.667 | 16.5% | 3.6 | 5.10 |

Al colocar una tubería de entrada de sección transversal similar en la parte media del cabezal de 6"x6", se obtendría la siguiente distribución:

$$F_o = 0.153$$

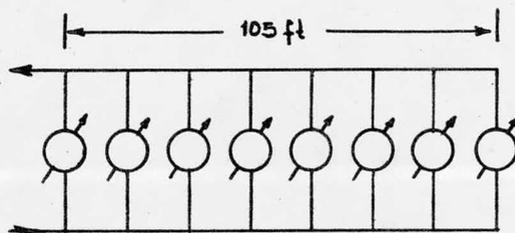
$$Y_o = 0.334$$

$$\text{Maldistribución} = 3.5 \%$$

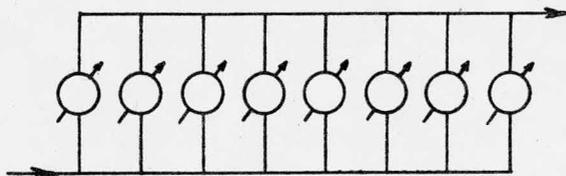
Ya que existen conexiones de línea secundaria cerca de la entrada central y en la vecindad de las cuales no se puede predecir con mucha precisión la distribución de presión, se puede asumir que tenemos un flujo de 3 % más alto que el mínimo; lo cual nos da como resultado que tengamos presente un flujo mínimo en la tercera línea secundaria a partir de la entrada.

- B) Se tienen 475 000 lb/ hr de agua de enfriamiento a 60°F en un cabezal de 8" cédula 40. En los diagramas siguientes se muestran las posibles alternativas para arreglos de distribución de flujo. Determinar la maldistribución presente en cada uno de ellos.

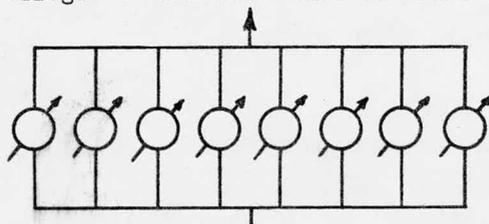
Caída de presión a través de la primera rama y el cambiador de calor igual a 3 psi aproximadamente.



(a) Arreglo a contracorriente en forma de "U"



(b) Arreglo a contracorriente en forma de "Z"



(c) Arreglo a contracorriente en forma de rectángulo.

Arreglo (a).- Cabezal de entrada: Determinar las caídas de presión debidas al efecto de momentum y al de fricción.

Velocidad de entrada $V_0 = 6.09 \text{ ft/seg}$

De la ecuación (28), el incremento de presión en el cabezal de entrada es:

$$\Sigma \Delta p_b = \frac{62.34 \times 6.09^2}{2 \times 32.174} \left(1.2 - \frac{4 \times 0.004 \times 105}{3 \times 0.66} \right) = 12.65 \text{ lb/ft}^2$$

De la ecuación (29), la disminución de presión en el cabezal de descarga (salida) de 8" con una temperatura del agua de 60°F:

$$\Sigma \Delta p_c = \frac{61.01 \times 6.21^2}{2 \times 32.174} \left(1.8 + \frac{4 \times 0.00375 \times 105}{3 \times 0.66} \right) = 95.5 \text{ lb/ft}^2$$

Debido a que la caída de presión a través de la primera rama y el cambiador de calor es aproximadamente de 3 psi = 432 lb/ft² y a que dicha caída de presión en la última rama y cambiador es: 432 + 95.5 - 12.65 = 514.85 lb/ft², la maldistribución estimada será de: (ecuación 30)

$$\text{Mal} = \left(\sqrt{\frac{514.85}{432}} - 1 \right) 100 = 9 \%$$

Este 9 % de flujo extra causaría una caída de presión de:

$(1.09^2 - 1) 432 = 51.4 \text{ lb/ft}^2$; la cual si se consumiera en un cambiador de calor cancelaría una gran parte de la diferencia de presión de: 95.5 - 12.65 = 82.85 lb/ft² que causa la maldistribución. El problema anterior deberá resolverse iterativamente.

Usando los mismos datos para el arreglo (b), la caída de presión a través de la primera rama del cabezal de salida es:

$432.0 + 95.5 = 527.5 \text{ lb/ft}^2$ y la caída de presión a través del cabezal de entrada y la última rama es: $432 + 12.65 = 419.4 \text{ lb/ft}^2$.

Lo cual nos proporciona una maldistribución del 12 %. Sin hacer caso del efecto de balanceo que ofrece el cambiador en el circuito.

Arreglo(c).- Para este arreglo se obtuvieron los siguientes valores:

$$\Sigma \Delta p_b = 6.53 \text{ lb/ft}^2 \quad \Sigma \Delta p_c = -20.4 \text{ lb/ft}^2 \quad \text{Mal} = 1.5 \%$$

9. MODELACION DEL PROBLEMA

" SISTEMAS DE CABEZALES DE DISTRIBUCION Y/O COLECCION MULTIPLE EN SUPERCALENTADORES "

Según se estableció, un sistema de cabezales de distribución y colección múltiple consiste de un conducto principal al cual están conectadas varias trayectorias paralelas de flujo; las cuales desembocan a un tubo de descarga común. Este tipo de cabezales se usa comunmente en equipos de transferencia de calor.

Los dos principales tipos de sistemas de cabezales a considerar son los siguientes:

- 1) Direcciones de entrada y salida del flujo en el mismo lado del arreglo paralelo (Figura A)
- 2) Direcciones de entrada y salida del flujo en lados opuestos del arreglo paralelo (Figura B)

El presente análisis determina la solución al problema de diseño y simulación, para el caso de sistemas de cabezales con direcciones de entrada y salida del flujo en el mismo lado del arreglo paralelo, así mismo como para las alternativas de flux de calor constante y zonificación de fluxes en la celda del horno en que se encuentra colocado el supercalentador.

La solución se enfoca hacia la determinación de los perfiles de: distribución de flujo, caída de presión, temperatura de pared, temperatura del fluido de proceso, coeficiente interno individual y coeficiente global de transferencia de calor; todo lo anterior por tubo y por zona de flux de calor constante en el sobrecalentador objeto del presente estudio según el siguiente planeamiento general:

1.- Determinación de los parámetros de diseño del equipo:

Diámetro del cabezal de distribución.

Diámetro del cabezal de colección.

Número de trayectorias paralelas de flujo. (tubos)

Longitud del tubo.

Diámetro del tubo.

Espaciamiento entre tubos.

Según las condiciones de operación presentes:

Gasto de fluido a manejar.

Temperatura de entrada del fluido.

Presión de entrada del fluido.

Propiedades físicas del fluido.

Flux o fluxes de calor en la celda.

(Determinación según zonificación basada en las propiedades geométricas y de operación del horno así como en las características de combustión presentes).

Haciendo uso de los criterios de dimensionamiento presentados en el desarrollo del tema y teniendo como limitantes factores tales como:

Caída de presión permisible en el equipo.

Temperatura de salida a la cual se requiere el fluido.

Limitantes termodinámicas y físicas propias del fluido de proceso a manejar.

2.- Simulación del equipo haciendo uso del dimensionamiento, para la determinación de los perfiles antes mencionados en donde se podrán detectar situaciones importantes para el diseño mecánico y térmico del supercalentador tales como:

Temperaturas de pared muy altas; de lo cual dependerá la presencia de puntos calientes y la elección del material a usar en la construcción.

Tubos con muy poco flujo; los cuales estarán sometidos a condiciones de calentamiento más severas.

Todo lo anterior se encaminará a tener la opción abierta para determinar el mejor diseño o el más económico, dependiendo de lo que se requiera y satisfaciendo el servicio para el cual está destinado el equipo.

A continuación se muestran algunos conceptos fundamentales para el objetivo que se persigue:

DISTRIBUCION DE FLUJO:

Según se puede observar de las figuras mostradas, tenemos un problema de trayectorias paralelas de flujo. La distribución de flujo se encuentra a través de una convergencia de prueba y error, en la cual se supone el flujo en cada una de las trayectorias y se iguala la caída de presión en cada una de las trayectorias posibles.

El criterio a seguir para la suposición del flujo en cada una de las trayectorias, estará basado en una analogía con los coeficientes de descarga en placas de orificio, según se mencionó en el presente texto. Para la corrección de esta primera suposición, se hace uso de un ajuste polinomial a los puntos generados. Esta curva al final nos arrojará el perfil real de distribución de flujo en las trayectorias paralelas.

CAIDA DE PRESION:

El cálculo de caída de presión se lleva a cabo en forma paralela al de determinación de distribución de flujo; ya que éste es el criterio que se sigue para la convergencia. Para la determinación de caída de presión se dispone de tres diferentes métodos, cada uno de los cuales desgloza el cálculo en caídas de presión friccionales y de momentum.

Habiendo satisfecho los anteriores puntos, se procede a determinar los perfiles restantes ya mencionados.

10. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de la solución a dos problemas de sistema de cabezales de distribución y colección múltiple.

El tratamiento para cada uno de estos casos es diferente, ya que se tienen variaciones en cuanto a las condiciones de flux de calor externo presentes en la celda. En el primer problema se tiene una tendencia a la idealidad ya que se considera la presencia de una única zona de flux de calor constante, situación poco factible en la realidad; en tanto que en el segundo, el sistema se ve sometido a la acción de diferentes zonas de flux de calor constante obtenidas mediante la simulación previa de una zonificación.

Los datos que se obtienen son los parámetros de diseño y los resultados de la simulación del sistema. Estos datos son los básicos para la especificación térmica y mecánica del equipo en questión.

La comparación y evaluación de los resultados obtenidos con el presente método para el problema de cabezales de distribución múltiple, se hizo contra una solución del mismo que se presentó en PFR ENGINEERING SYSTEMS, INC. Fourth Annual Technical Seminar, Febrero 6, 1976; Pasadena, California.

Los principales factores de comparación fueron la maldistribución de flujo y la caída de presión; obteniéndose con el primero de ellos una concordancia de -4.1 a $+ 5.6 \%$ y con el segundo $+ 7.2 \%$, respecto a los resultados presentados en el Seminario mencionado. Las anteriores variaciones se consideraron aceptables para los fines de diseño y simulación que se persiguen.

| | | |
|--|----------|--------|
| INDICE DE TIPO DE FLUX (IFL) | | 1 |
| NUMERO DE ZONAS POR TUBO (N) | | 1 |
| INDICE DE TIPO DE CABEZAL (ICA) | | 1 |
| NUMERO DE DATOS DE FLUJO PARA EL AJUSTE DE LA CURVA DE DISTRIBUCION (LL) | | 6 |
| INDICE DE METODO COEF. TRANSF. CALOR (IMH) | | 1 |
| INDICE DE METODO CAIDA DE PRESION (IM) | | 1 |
| INDICE DE GENERACION DE GRAFICAS (KAN) | | 1 |
| NUMERO DE TUBOS (NTT) | 96 | |
| LONGITUD DEL TUBO (LT) | 25.00 | FT |
| DIAM. INT. DEL TUBO (DMI) | .3698 | FT |
| DIA. INT. DEL CABEZAL (DMA) | 1.3333 | FT |
| GASTO TOTAL DE FLUJO (WVAT) | 53092.00 | LB/HR |
| TEMPERATURA DEL FLUIDO (TVA1) | 1260.00 | GF |
| PRESION DEL FLUIDO (PME) | 34.40 | LB/IN2 |

ZONIFICACION DE FLUXES

| TEMP. (GF) | L. ZONA (FT) | FLUX (BTU/HRFT2) |
|-------------------------------|--------------|------------------|
| 1895.00 | .833 | 12000.00 |
| 1895.00 | 25.000 | 12000.00 |
| 1895.00 | .833 | 12000.00 |
| GASTO PROMEDIO DE FLUJO (W/P) | 559.29 | LB/HR |

I TUBO I.O.
 J ZONA DE FLUX CTE. NO.
 AFWT(I) FLUJO EN EL TUBO I (LB/HR)
 PD(I) CAIDA DE PRESION TUBO I (LB/IN2)
 ATW(J,I) TEMP. PARED DEL TUBO I ZONA J (GF)
 ATVA(J,I) TEMP. FLUIDO DEL TUBO I ZONA J (GF)
 AHIO(J,I) COEF. INDIV. TRANSF. CALOR TUBO I ZONA J (BTU/HRFT2GF)
 AUG(J,I) COEF. GLOB. TRANSF. CALOR TUBO I ZONA J (BTU/HRFT2GF)

| I | AFWT(I) | PD(I) | J | AUG(J,I) | AHIO(J,I) | ATW(J,I) | ATVA(J,I) |
|----|---------|---------|---|----------|-----------|----------|-----------|
| 1 | 715.89 | 2.81550 | 1 | 10.885 | 25.673 | 1529.16 | 1260.98 |
| | | | 2 | 5.506 | 7.966 | 1707.19 | 1574.42 |
| | | | 3 | 16.682 | 30.092 | 1751.17 | 1575.14 |
| 2 | 710.34 | 2.57476 | 1 | 10.846 | 25.404 | 1531.59 | 1261.96 |
| | | | 2 | 5.566 | 7.919 | 1708.46 | 1576.17 |
| | | | 3 | 16.649 | 29.801 | 1753.66 | 1576.90 |
| 3 | 704.86 | 2.53481 | 1 | 10.807 | 25.136 | 1534.04 | 1262.95 |
| | | | 2 | 5.566 | 7.874 | 1709.71 | 1577.92 |
| | | | 3 | 16.595 | 29.501 | 1755.66 | 1578.66 |
| 4 | 699.45 | 2.49503 | 1 | 10.767 | 24.870 | 1536.50 | 1263.96 |
| | | | 2 | 5.540 | 7.829 | 1710.97 | 1579.67 |
| | | | 3 | 16.540 | 29.203 | 1757.65 | 1580.42 |
| 5 | 694.12 | 2.45721 | 1 | 10.726 | 24.605 | 1538.97 | 1264.96 |
| | | | 2 | 5.526 | 7.784 | 1712.21 | 1581.41 |
| | | | 3 | 16.484 | 28.906 | 1759.63 | 1582.17 |
| 6 | 688.66 | 2.41955 | 1 | 10.685 | 24.341 | 1541.46 | 1265.98 |
| | | | 2 | 5.506 | 7.740 | 1713.45 | 1583.16 |
| | | | 3 | 16.427 | 28.610 | 1761.61 | 1583.93 |
| 7 | 683.67 | 2.38263 | 1 | 10.644 | 24.079 | 1543.96 | 1267.01 |
| | | | 2 | 5.487 | 7.697 | 1714.68 | 1584.90 |
| | | | 3 | 16.368 | 28.316 | 1763.57 | 1585.68 |
| 8 | 678.56 | 2.34644 | 1 | 10.602 | 23.818 | 1546.48 | 1268.04 |
| | | | 2 | 5.468 | 7.654 | 1715.90 | 1586.63 |
| | | | 3 | 16.309 | 28.022 | 1765.52 | 1587.43 |
| 9 | 673.51 | 2.31097 | 1 | 10.560 | 23.558 | 1549.01 | 1269.08 |
| | | | 2 | 5.449 | 7.612 | 1717.12 | 1588.37 |
| | | | 3 | 16.247 | 27.729 | 1767.46 | 1589.17 |
| 10 | 668.55 | 2.27622 | 1 | 10.517 | 23.299 | 1551.55 | 1270.14 |
| | | | 2 | 5.430 | 7.570 | 1718.32 | 1590.10 |
| | | | 3 | 16.185 | 27.437 | 1769.39 | 1590.91 |
| 11 | 663.65 | 2.24217 | 1 | 10.474 | 23.042 | 1554.11 | 1271.20 |
| | | | 2 | 5.411 | 7.529 | 1719.52 | 1591.82 |
| | | | 3 | 16.121 | 27.147 | 1771.31 | 1592.65 |
| 12 | 658.63 | 2.20881 | 1 | 10.431 | 22.785 | 1556.68 | 1272.27 |
| | | | 2 | 5.393 | 7.489 | 1720.72 | 1593.55 |
| | | | 3 | 16.055 | 26.857 | 1773.21 | 1594.39 |
| 13 | 654.68 | 2.17614 | 1 | 10.386 | 22.530 | 1559.27 | 1273.34 |
| | | | 2 | 5.375 | 7.449 | 1721.90 | 1595.27 |
| | | | 3 | 15.988 | 26.568 | 1775.11 | 1596.12 |
| 14 | 649.40 | 2.14414 | 1 | 10.342 | 22.275 | 1561.87 | 1274.43 |
| | | | 2 | 5.357 | 7.410 | 1723.08 | 1596.98 |

| | | | | | | | |
|----|--------|---------|---|--------|--------|---------|---------|
| | | | 3 | 15.920 | 26.280 | 1776.99 | 1597.85 |
| 15 | 644.80 | 2.11262 | 1 | 10.296 | 22.022 | 1564.49 | 1275.53 |
| | | | 2 | 5.340 | 7.372 | 1724.25 | 1596.69 |
| | | | 3 | 15.850 | 25.993 | 1778.86 | 1599.57 |
| 16 | 640.27 | 2.08215 | 1 | 10.250 | 21.770 | 1567.12 | 1276.63 |
| | | | 2 | 5.322 | 7.334 | 1725.41 | 1600.40 |
| | | | 3 | 15.779 | 25.706 | 1780.72 | 1601.29 |
| 17 | 635.81 | 2.05213 | 1 | 10.204 | 21.519 | 1569.77 | 1277.74 |
| | | | 2 | 5.305 | 7.296 | 1726.56 | 1602.10 |
| | | | 3 | 15.706 | 25.421 | 1782.57 | 1603.00 |
| 18 | 631.43 | 2.02275 | 1 | 10.157 | 21.269 | 1572.44 | 1278.87 |
| | | | 2 | 5.288 | 7.260 | 1727.71 | 1603.80 |
| | | | 3 | 15.631 | 25.136 | 1784.40 | 1604.71 |
| 19 | 627.11 | 1.99401 | 1 | 10.109 | 21.020 | 1575.12 | 1280.00 |
| | | | 2 | 5.272 | 7.224 | 1728.84 | 1605.49 |
| | | | 3 | 15.555 | 24.852 | 1786.22 | 1606.42 |
| 20 | 622.80 | 1.96590 | 1 | 10.061 | 20.771 | 1577.81 | 1281.14 |
| | | | 2 | 5.256 | 7.198 | 1729.97 | 1607.17 |
| | | | 3 | 15.478 | 24.569 | 1788.03 | 1608.12 |
| 21 | 618.71 | 1.93840 | 1 | 10.012 | 20.524 | 1580.53 | 1282.30 |
| | | | 2 | 5.240 | 7.153 | 1731.09 | 1608.86 |
| | | | 3 | 15.399 | 24.286 | 1789.83 | 1609.82 |
| 22 | 614.62 | 1.91151 | 1 | 9.963 | 20.277 | 1583.26 | 1283.46 |
| | | | 2 | 5.224 | 7.119 | 1732.20 | 1610.53 |
| | | | 3 | 15.318 | 24.004 | 1791.61 | 1611.50 |
| 23 | 610.60 | 1.88522 | 1 | 9.912 | 20.031 | 1586.00 | 1284.63 |
| | | | 2 | 5.209 | 7.086 | 1733.30 | 1612.20 |
| | | | 3 | 15.235 | 23.723 | 1793.39 | 1613.19 |
| 24 | 606.65 | 1.85953 | 1 | 9.862 | 19.786 | 1588.77 | 1285.81 |
| | | | 2 | 5.193 | 7.053 | 1734.40 | 1613.86 |
| | | | 3 | 15.151 | 23.442 | 1795.14 | 1614.87 |
| 25 | 602.78 | 1.83443 | 1 | 9.810 | 19.542 | 1591.55 | 1287.00 |
| | | | 2 | 5.179 | 7.021 | 1735.48 | 1615.52 |
| | | | 3 | 15.065 | 23.162 | 1796.89 | 1616.54 |
| 26 | 598.98 | 1.80991 | 1 | 9.758 | 19.299 | 1594.34 | 1288.21 |
| | | | 2 | 5.164 | 6.989 | 1736.56 | 1617.17 |
| | | | 3 | 14.977 | 22.882 | 1798.62 | 1618.21 |
| 27 | 595.25 | 1.78596 | 1 | 9.705 | 19.056 | 1597.16 | 1289.42 |
| | | | 2 | 5.150 | 6.958 | 1737.63 | 1618.81 |
| | | | 3 | 14.888 | 22.603 | 1800.34 | 1619.87 |
| 28 | 591.60 | 1.79979 | 1 | 9.651 | 18.814 | 1599.99 | 1290.64 |
| | | | 2 | 5.136 | 6.928 | 1738.68 | 1620.45 |
| | | | 3 | 14.796 | 22.324 | 1802.04 | 1621.52 |
| 29 | 588.02 | 1.77711 | 1 | 9.596 | 18.572 | 1602.84 | 1291.88 |
| | | | 2 | 5.122 | 6.898 | 1739.73 | 1622.07 |
| | | | 3 | 14.703 | 22.045 | 1803.73 | 1623.17 |
| 30 | 584.51 | 1.75498 | 1 | 9.541 | 18.332 | 1605.71 | 1293.12 |
| | | | 2 | 5.109 | 6.869 | 1740.78 | 1623.70 |
| | | | 3 | 14.608 | 21.767 | 1805.41 | 1624.81 |
| 31 | 581.08 | 1.73339 | 1 | 9.485 | 18.091 | 1608.60 | 1294.38 |
| | | | 2 | 5.096 | 6.841 | 1741.81 | 1625.31 |
| | | | 3 | 14.511 | 21.490 | 1807.07 | 1626.44 |
| 32 | 577.72 | 1.71234 | 1 | 9.428 | 17.852 | 1611.51 | 1295.64 |
| | | | 2 | 5.084 | 6.814 | 1742.83 | 1626.92 |
| | | | 3 | 14.412 | 21.212 | 1808.72 | 1628.07 |
| 33 | 574.43 | 1.69182 | 1 | 9.370 | 17.612 | 1614.44 | 1296.92 |
| | | | 2 | 5.071 | 6.787 | 1743.85 | 1628.52 |
| | | | 3 | 14.311 | 20.935 | 1810.36 | 1629.69 |
| 34 | 571.21 | 1.67183 | 1 | 9.311 | 17.374 | 1617.39 | 1298.21 |
| | | | 2 | 5.059 | 6.760 | 1744.85 | 1630.11 |
| | | | 3 | 14.208 | 20.658 | 1811.98 | 1631.30 |

| | | | | | | | |
|----|--------|---------|---|--------|--------|---------|---------|
| 35 | 568.07 | 1.65235 | 1 | 9.251 | 17.135 | 1620.36 | 1299.51 |
| | | | 2 | 5.048 | 6.735 | 1745.85 | 1631.69 |
| | | | 3 | 14.103 | 20.381 | 1813.59 | 1532.90 |
| 36 | 565.00 | 1.63339 | 1 | 9.191 | 16.897 | 1623.35 | 1300.82 |
| | | | 2 | 5.037 | 6.710 | 1746.84 | 1633.26 |
| | | | 3 | 13.996 | 20.105 | 1815.19 | 1634.50 |
| 37 | 562.01 | 1.61494 | 1 | 9.129 | 16.660 | 1626.36 | 1502.15 |
| | | | 2 | 5.026 | 6.686 | 1747.81 | 1634.83 |
| | | | 3 | 13.887 | 19.828 | 1816.77 | 1636.09 |
| 38 | 559.08 | 1.59699 | 1 | 9.066 | 16.422 | 1629.39 | 1503.48 |
| | | | 2 | 5.015 | 6.662 | 1748.78 | 1536.39 |
| | | | 3 | 13.776 | 19.552 | 1818.34 | 1537.67 |
| 39 | 556.24 | 1.57954 | 1 | 9.003 | 16.185 | 1632.44 | 1504.83 |
| | | | 2 | 5.005 | 6.639 | 1749.74 | 1637.04 |
| | | | 3 | 13.662 | 19.275 | 1819.89 | 1639.24 |
| 40 | 553.46 | 1.56259 | 1 | 8.938 | 15.949 | 1635.52 | 1506.19 |
| | | | 2 | 4.995 | 6.617 | 1750.70 | 1639.48 |
| | | | 3 | 13.547 | 18.999 | 1821.43 | 1640.81 |
| 41 | 550.76 | 1.54613 | 1 | 8.872 | 15.712 | 1638.62 | 1507.57 |
| | | | 2 | 4.986 | 6.596 | 1751.64 | 1641.01 |
| | | | 3 | 13.429 | 18.722 | 1822.96 | 1642.37 |
| 42 | 548.13 | 1.53016 | 1 | 8.805 | 15.476 | 1641.74 | 1508.05 |
| | | | 2 | 4.977 | 6.575 | 1752.57 | 1642.53 |
| | | | 3 | 13.309 | 18.446 | 1824.48 | 1643.92 |
| 43 | 545.57 | 1.51467 | 1 | 8.737 | 15.239 | 1644.89 | 1510.35 |
| | | | 2 | 4.968 | 6.555 | 1753.50 | 1644.05 |
| | | | 3 | 13.187 | 18.169 | 1825.98 | 1645.46 |
| 44 | 543.09 | 1.49966 | 1 | 8.667 | 15.003 | 1648.06 | 1511.75 |
| | | | 2 | 4.960 | 6.536 | 1754.42 | 1645.55 |
| | | | 3 | 13.062 | 17.892 | 1827.47 | 1646.99 |
| 45 | 540.88 | 1.48513 | 1 | 8.597 | 14.767 | 1651.26 | 1513.19 |
| | | | 2 | 4.952 | 6.517 | 1755.32 | 1647.05 |
| | | | 3 | 12.935 | 17.614 | 1828.94 | 1648.52 |
| 46 | 538.34 | 1.47107 | 1 | 8.525 | 14.531 | 1654.48 | 1514.63 |
| | | | 2 | 4.945 | 6.499 | 1756.22 | 1648.54 |
| | | | 3 | 12.805 | 17.337 | 1830.40 | 1650.04 |
| 47 | 536.07 | 1.45747 | 1 | 8.451 | 14.294 | 1657.73 | 1516.08 |
| | | | 2 | 4.938 | 6.482 | 1757.11 | 1650.01 |
| | | | 3 | 12.673 | 17.059 | 1831.85 | 1651.55 |
| 48 | 533.88 | 1.44435 | 1 | 8.377 | 14.053 | 1661.00 | 1517.55 |
| | | | 2 | 4.931 | 6.465 | 1757.99 | 1651.48 |
| | | | 3 | 12.538 | 16.791 | 1833.29 | 1653.05 |
| 49 | 531.77 | 1.43168 | 1 | 8.301 | 13.821 | 1664.31 | 1519.03 |
| | | | 2 | 4.925 | 6.450 | 1753.87 | 1652.94 |
| | | | 3 | 12.401 | 16.502 | 1834.71 | 1654.54 |
| 50 | 529.72 | 1.41948 | 1 | 8.223 | 13.534 | 1667.64 | 1520.53 |
| | | | 2 | 4.919 | 6.434 | 1759.73 | 1654.39 |
| | | | 3 | 12.261 | 16.222 | 1836.13 | 1656.03 |
| 51 | 527.75 | 1.40774 | 1 | 8.144 | 13.347 | 1671.00 | 1522.04 |
| | | | 2 | 4.914 | 6.420 | 1760.59 | 1655.83 |
| | | | 3 | 12.119 | 15.943 | 1837.53 | 1657.51 |
| 52 | 525.65 | 1.39545 | 1 | 8.063 | 13.110 | 1674.39 | 1523.57 |
| | | | 2 | 4.909 | 6.407 | 1761.44 | 1657.26 |
| | | | 3 | 11.974 | 15.662 | 1838.91 | 1658.98 |
| 53 | 524.63 | 1.38501 | 1 | 7.980 | 12.872 | 1677.81 | 1525.11 |
| | | | 2 | 4.905 | 6.394 | 1762.28 | 1658.69 |
| | | | 3 | 11.826 | 15.381 | 1840.29 | 1660.44 |
| 54 | 522.28 | 1.37523 | 1 | 7.896 | 12.634 | 1681.26 | 1526.67 |
| | | | 2 | 4.901 | 6.382 | 1763.11 | 1660.10 |
| | | | 3 | 11.675 | 15.099 | 1841.66 | 1661.90 |
| 55 | 520.60 | 1.36529 | 1 | 7.810 | 12.395 | 1684.74 | 1528.25 |

| | | | | | | | |
|----|--------|---------|---|--------|--------|---------|---------|
| | | | 2 | 4.897 | 6.370 | 1763.94 | 1661.50 |
| | | | 3 | 11.521 | 14.816 | 1843.01 | 1663.35 |
| 56 | 518.99 | 1.35560 | 1 | 7.722 | 12.156 | 1688.26 | 1529.94 |
| | | | 2 | 4.894 | 6.360 | 1764.75 | 1662.90 |
| | | | 3 | 11.364 | 14.532 | 1844.35 | 1664.79 |
| 57 | 517.46 | 1.34676 | 1 | 7.633 | 11.916 | 1691.81 | 1531.45 |
| | | | 2 | 4.891 | 6.350 | 1765.56 | 1664.29 |
| | | | 3 | 11.204 | 14.248 | 1845.68 | 1666.23 |
| 58 | 516.00 | 1.33817 | 1 | 7.541 | 11.675 | 1695.40 | 1533.08 |
| | | | 2 | 4.889 | 6.341 | 1766.37 | 1665.66 |
| | | | 3 | 11.042 | 13.962 | 1847.00 | 1667.66 |
| 59 | 514.62 | 1.33002 | 1 | 7.447 | 11.434 | 1699.02 | 1534.72 |
| | | | 2 | 4.886 | 6.333 | 1767.16 | 1667.03 |
| | | | 3 | 10.876 | 13.676 | 1848.31 | 1669.08 |
| 60 | 513.30 | 1.32231 | 1 | 7.351 | 11.192 | 1702.66 | 1536.38 |
| | | | 2 | 4.886 | 6.325 | 1767.95 | 1668.39 |
| | | | 3 | 10.706 | 13.388 | 1849.61 | 1670.50 |
| 61 | 512.07 | 1.31505 | 1 | 7.252 | 10.949 | 1706.38 | 1538.07 |
| | | | 2 | 4.886 | 6.318 | 1768.73 | 1669.75 |
| | | | 3 | 10.534 | 13.099 | 1850.91 | 1671.92 |
| 62 | 510.90 | 1.30823 | 1 | 7.152 | 10.705 | 1710.12 | 1539.77 |
| | | | 2 | 4.885 | 6.312 | 1769.51 | 1671.09 |
| | | | 3 | 10.358 | 12.808 | 1852.19 | 1673.33 |
| 63 | 509.61 | 1.30165 | 1 | 7.049 | 10.460 | 1713.90 | 1541.49 |
| | | | 2 | 4.886 | 6.307 | 1770.22 | 1672.43 |
| | | | 3 | 10.178 | 12.516 | 1853.46 | 1674.74 |
| 64 | 508.79 | 1.29592 | 1 | 6.943 | 10.214 | 1717.73 | 1543.23 |
| | | | 2 | 4.887 | 6.303 | 1771.04 | 1673.76 |
| | | | 3 | 9.995 | 12.223 | 1854.72 | 1676.14 |
| 65 | 507.64 | 1.29043 | 1 | 6.834 | 9.966 | 1721.60 | 1545.00 |
| | | | 2 | 4.888 | 6.299 | 1771.80 | 1675.08 |
| | | | 3 | 9.808 | 11.928 | 1855.98 | 1677.54 |
| 66 | 506.97 | 1.28536 | 1 | 6.723 | 9.717 | 1725.51 | 1546.78 |
| | | | 2 | 4.890 | 6.296 | 1772.55 | 1676.40 |
| | | | 3 | 9.617 | 11.631 | 1857.23 | 1678.94 |
| 67 | 506.17 | 1.28076 | 1 | 6.609 | 9.467 | 1729.47 | 1548.59 |
| | | | 2 | 4.892 | 6.294 | 1773.30 | 1677.71 |
| | | | 3 | 9.423 | 11.333 | 1858.47 | 1680.34 |
| 68 | 505.44 | 1.27663 | 1 | 6.492 | 9.216 | 1733.48 | 1550.42 |
| | | | 2 | 4.895 | 6.293 | 1774.04 | 1679.01 |
| | | | 3 | 9.224 | 11.032 | 1859.70 | 1681.74 |
| 69 | 504.79 | 1.27293 | 1 | 6.371 | 8.962 | 1737.54 | 1552.28 |
| | | | 2 | 4.899 | 6.293 | 1774.78 | 1680.31 |
| | | | 3 | 9.021 | 10.730 | 1860.93 | 1683.14 |
| 70 | 504.21 | 1.26907 | 1 | 6.247 | 8.708 | 1741.66 | 1554.16 |
| | | | 2 | 4.903 | 6.293 | 1775.52 | 1681.61 |
| | | | 3 | 8.814 | 10.425 | 1862.15 | 1684.54 |
| 71 | 503.71 | 1.26667 | 1 | 6.120 | 8.451 | 1745.83 | 1556.97 |
| | | | 2 | 4.907 | 6.294 | 1776.25 | 1682.90 |
| | | | 3 | 8.602 | 10.118 | 1863.37 | 1685.95 |
| 72 | 503.27 | 1.26453 | 1 | 5.989 | 8.192 | 1750.05 | 1558.00 |
| | | | 2 | 4.912 | 6.296 | 1776.97 | 1684.18 |
| | | | 3 | 8.386 | 9.809 | 1864.58 | 1687.36 |
| 73 | 502.91 | 1.26264 | 1 | 5.853 | 7.931 | 1754.34 | 1559.96 |
| | | | 2 | 4.918 | 6.299 | 1777.70 | 1685.47 |
| | | | 3 | 8.165 | 9.497 | 1865.78 | 1688.79 |
| 74 | 502.63 | 1.26121 | 1 | 5.714 | 7.668 | 1758.69 | 1561.95 |
| | | | 2 | 4.924 | 6.303 | 1778.42 | 1686.75 |
| | | | 3 | 7.938 | 9.182 | 1866.98 | 1690.22 |
| 75 | 502.41 | 1.26025 | 1 | 5.570 | 7.402 | 1763.11 | 1563.97 |
| | | | 2 | 4.931 | 6.307 | 1779.14 | 1688.03 |

| | | | | | | | |
|----|--------|---------|---|-------|-------|---------|---------|
| | | | 3 | 7.707 | 8.865 | 1868.18 | 1691.67 |
| 76 | 502.27 | 1.25976 | 1 | 5.422 | 7.134 | 1767.60 | 1366.03 |
| | | | 2 | 4.939 | 6.313 | 1779.86 | 1689.31 |
| | | | 3 | 7.470 | 8.544 | 1869.38 | 1693.13 |
| 77 | 502.21 | 1.25974 | 1 | 5.269 | 6.863 | 1772.15 | 1368.11 |
| | | | 2 | 4.947 | 6.319 | 1780.58 | 1690.59 |
| | | | 3 | 7.227 | 8.219 | 1870.57 | 1694.61 |
| 78 | 502.21 | 1.26020 | 1 | 5.110 | 6.589 | 1776.79 | 1370.24 |
| | | | 2 | 4.955 | 6.326 | 1781.30 | 1691.87 |
| | | | 3 | 6.979 | 7.891 | 1871.77 | 1696.12 |
| 79 | 502.30 | 1.26115 | 1 | 4.946 | 6.312 | 1781.51 | 1372.40 |
| | | | 2 | 4.965 | 6.334 | 1782.02 | 1693.15 |
| | | | 3 | 6.724 | 7.560 | 1872.96 | 1697.66 |
| 80 | 502.45 | 1.26259 | 1 | 4.776 | 6.031 | 1786.31 | 1374.60 |
| | | | 2 | 4.975 | 6.343 | 1782.75 | 1694.44 |
| | | | 3 | 6.462 | 7.224 | 1874.15 | 1699.23 |
| 81 | 502.68 | 1.26433 | 1 | 4.600 | 5.746 | 1791.21 | 1376.84 |
| | | | 2 | 4.985 | 6.353 | 1783.47 | 1695.74 |
| | | | 3 | 6.194 | 6.883 | 1875.35 | 1700.85 |
| 82 | 502.96 | 1.26697 | 1 | 4.417 | 5.458 | 1796.20 | 1379.13 |
| | | | 2 | 4.997 | 6.364 | 1784.20 | 1697.04 |
| | | | 3 | 5.918 | 6.538 | 1876.54 | 1702.52 |
| 83 | 503.35 | 1.26973 | 1 | 4.226 | 5.165 | 1801.30 | 1381.46 |
| | | | 2 | 5.009 | 6.375 | 1784.94 | 1698.35 |
| | | | 3 | 5.634 | 6.188 | 1877.75 | 1704.26 |
| 84 | 503.60 | 1.27341 | 1 | 4.028 | 4.867 | 1806.51 | 1383.85 |
| | | | 2 | 5.022 | 6.368 | 1785.68 | 1699.67 |
| | | | 3 | 5.341 | 5.831 | 1878.95 | 1706.98 |
| 85 | 504.32 | 1.27744 | 1 | 3.821 | 4.564 | 1811.84 | 1386.30 |
| | | | 2 | 5.035 | 6.402 | 1786.43 | 1701.91 |
| | | | 3 | 5.039 | 5.469 | 1880.17 | 1708.01 |
| 86 | 504.91 | 1.28201 | 1 | 3.604 | 4.254 | 1817.30 | 1388.80 |
| | | | 2 | 5.049 | 6.416 | 1787.19 | 1702.37 |
| | | | 3 | 4.728 | 5.099 | 1881.39 | 1710.08 |
| 87 | 505.58 | 1.28720 | 1 | 3.469 | 4.063 | 1818.96 | 1391.45 |
| | | | 2 | 5.065 | 6.432 | 1787.99 | 1703.79 |
| | | | 3 | 4.406 | 4.722 | 1882.63 | 1712.38 |
| 88 | 506.32 | 1.29302 | 1 | 3.226 | 3.731 | 1824.99 | 1394.17 |
| | | | 2 | 5.081 | 6.449 | 1788.81 | 1705.24 |
| | | | 3 | 4.071 | 4.336 | 1883.89 | 1714.94 |
| 89 | 507.13 | 1.29945 | 1 | 2.969 | 3.389 | 1831.22 | 1396.99 |
| | | | 2 | 5.098 | 6.467 | 1789.64 | 1706.72 |
| | | | 3 | 3.724 | 3.941 | 1885.16 | 1717.86 |
| 90 | 508.02 | 1.30632 | 1 | 2.697 | 3.037 | 1837.68 | 1399.90 |
| | | | 2 | 5.117 | 6.486 | 1790.50 | 1708.24 |
| | | | 3 | 3.362 | 3.534 | 1886.46 | 1721.32 |
| 91 | 508.98 | 1.31425 | 1 | 2.408 | 2.674 | 1844.40 | 1402.94 |
| | | | 2 | 5.136 | 6.506 | 1791.39 | 1709.92 |
| | | | 3 | 2.982 | 3.113 | 1887.80 | 1725.66 |
| 92 | 510.01 | 1.32274 | 1 | 2.093 | 2.295 | 1851.42 | 1406.13 |
| | | | 2 | 5.156 | 6.528 | 1792.32 | 1711.47 |
| | | | 3 | 2.583 | 2.677 | 1889.20 | 1731.57 |
| 93 | 511.12 | 1.33198 | 1 | 1.763 | 1.899 | 1858.84 | 1409.51 |
| | | | 2 | 5.178 | 6.551 | 1793.30 | 1713.20 |
| | | | 3 | 2.160 | 2.222 | 1890.68 | 1740.73 |
| 94 | 512.30 | 1.34204 | 1 | 1.395 | 1.479 | 1866.75 | 1413.14 |
| | | | 2 | 5.202 | 6.575 | 1794.36 | 1715.07 |
| | | | 3 | 1.708 | 1.742 | 1892.34 | 1758.77 |
| 95 | 513.56 | 1.35293 | 1 | 0.983 | 1.023 | 1875.39 | 1417.16 |
| | | | 2 | 5.228 | 6.602 | 1795.54 | 1717.15 |
| | | | 3 | 1.231 | 1.240 | 1894.47 | 1823.42 |

| | | |
|--|----------|--------|
| INDICE DE TIPO DE FLUX (IEL) | | 2 |
| NUMERO DE ZONAS POR TUBO (N) | | 3 |
| INDICE DE TIPO DE CABEZAL (ICA) | | 1 |
| NUMERO DE DATOS DE FLUJO PARA EL AJUSTE DE LA CURVA DE DISTRIBUCION (LL) | | 6 |
| INDICE DE METODO COEF. TRANSF. CALOR (IMH) | | 1 |
| INDICE DE METODO CAIDA DE PRESION (IM) | | 1 |
| INDICE DE GENERACION DE GRAFICAS (KAN) | | 1 |
| NUMERO DE TUBOS (NTT) | 96 | |
| LONGITUD DEL TUBO (LT) | 25.00 | FT |
| DIAM. INT. DEL TUBO (DMI) | .3698 | FT |
| DIA. INT. DEL CABEZAL (UMA) | 1.3333 | FT |
| GASTO TOTAL DE FLUJO (WVAT) | 53692.00 | LB/HR |
| TEMPERATURA DEL FLUIDO (TVA1) | 1260.00 | GF |
| PRESION DEL FLUIDO (PME) | 34.40 | LB/IN2 |

ZONIFICACION DE FLUXES

| TEMP. (GF) | L. ZONA (FT) | FLUX (BTU/HRFT2) |
|-------------------------------|--------------|------------------|
| 1354.00 | .833 | 5110.00 |
| 1428.00 | 8.333 | 6170.00 |
| 1602.00 | 8.333 | 9397.00 |
| 1874.00 | 8.333 | 15560.00 |
| 2213.00 | .833 | 24000.00 |
| GASTO PROMEDIO DE FLUJO (L.P) | 559.29 | LB/HR |

I TUBO NO.
 J ZONA DE FLUX CTE. NO.
 AFWT(I) FLUJO EN EL TUBO I (LB/HR)
 PD(I) CAIDA DE PRESION TUBO I (LB/IN2)
 ATW(J,I) TEMP. PARED DEL TUBO I ZONA J (GF)
 ATVA(J,I) TEMP. FLUIDO DEL TUBO I ZONA J (GF)
 AHIO(J,I) COEF. INDIV. TRANSF. CALOR TUBO I ZONA J (BTU/HRFT2GF)
 AUG(J,I) COEF. GLOB. TRANSF. CALOR TUBO I ZONA J (BTU/HRFT2GF)

| I | AFWT(I) | PD(I) | J | AUG(J,I) | AHIO(J,I) | ATW(J,I) | ATVA(J,I) |
|---|---------|--------|---|----------|-----------|----------|-----------|
| 1 | 715.89 | .45728 | 1 | 17.894 | 26.674 | 1322.94 | 1260.24 |
| | | | 2 | 6.858 | 8.431 | 1396.42 | 1294.06 |
| | | | 3 | 6.607 | 8.478 | 1537.63 | 1354.74 |
| | | | 4 | 6.529 | 8.348 | 1760.87 | 1453.03 |
| | | | 5 | 14.679 | 27.426 | 1859.66 | 1454.56 |
| 2 | 710.34 | .44565 | 1 | 17.781 | 26.391 | 1323.29 | 1260.48 |
| | | | 2 | 6.326 | 8.379 | 1396.65 | 1294.36 |
| | | | 3 | 6.577 | 8.426 | 1538.08 | 1355.17 |
| | | | 4 | 6.500 | 8.298 | 1761.58 | 1453.69 |
| | | | 5 | 14.620 | 27.156 | 1863.11 | 1455.24 |
| 3 | 704.86 | .43462 | 1 | 17.667 | 26.110 | 1323.64 | 1260.72 |
| | | | 2 | 6.794 | 8.328 | 1396.89 | 1294.65 |
| | | | 3 | 6.547 | 8.375 | 1538.53 | 1355.60 |
| | | | 4 | 6.470 | 8.248 | 1762.27 | 1454.34 |
| | | | 5 | 14.542 | 26.866 | 1865.61 | 1455.91 |
| 4 | 699.45 | .42359 | 1 | 17.553 | 25.830 | 1323.99 | 1260.96 |
| | | | 2 | 6.762 | 8.278 | 1397.12 | 1294.94 |
| | | | 3 | 6.517 | 8.325 | 1538.97 | 1356.02 |
| | | | 4 | 6.441 | 8.198 | 1762.96 | 1454.99 |
| | | | 5 | 14.463 | 26.578 | 1868.11 | 1456.59 |
| 5 | 694.12 | .41275 | 1 | 17.439 | 25.552 | 1324.34 | 1261.20 |
| | | | 2 | 6.731 | 8.228 | 1397.36 | 1295.23 |
| | | | 3 | 6.488 | 8.275 | 1539.41 | 1356.45 |
| | | | 4 | 6.412 | 8.150 | 1763.64 | 1455.64 |
| | | | 5 | 14.383 | 26.291 | 1870.62 | 1457.26 |
| 6 | 688.86 | .40211 | 1 | 17.323 | 25.275 | 1324.69 | 1261.44 |
| | | | 2 | 6.700 | 8.179 | 1397.59 | 1295.53 |
| | | | 3 | 6.459 | 8.226 | 1539.84 | 1356.87 |
| | | | 4 | 6.383 | 8.101 | 1764.32 | 1456.29 |
| | | | 5 | 14.303 | 26.005 | 1873.13 | 1457.93 |
| 7 | 683.67 | .39166 | 1 | 17.207 | 24.999 | 1325.04 | 1261.69 |
| | | | 2 | 6.669 | 8.131 | 1397.81 | 1295.82 |
| | | | 3 | 6.430 | 8.177 | 1540.27 | 1357.30 |
| | | | 4 | 6.354 | 8.054 | 1764.99 | 1456.93 |
| | | | 5 | 14.222 | 25.721 | 1875.65 | 1458.59 |
| 8 | 678.56 | .38140 | 1 | 17.091 | 24.725 | 1325.39 | 1261.93 |
| | | | 2 | 6.639 | 8.083 | 1398.04 | 1296.12 |
| | | | 3 | 6.402 | 8.129 | 1540.69 | 1357.72 |
| | | | 4 | 6.326 | 8.007 | 1765.65 | 1457.57 |
| | | | 5 | 14.141 | 25.438 | 1878.17 | 1459.26 |
| 9 | 673.51 | .37132 | 1 | 16.974 | 24.451 | 1325.73 | 1262.18 |

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|--------|--------|---------|---------|
| | | | 2 | 6.608 | 8.035 | 1398.26 | 1296.41 |
| | | | 3 | 6.374 | 8.081 | 1541.11 | 1358.14 |
| | | | 4 | 6.298 | 7.960 | 1766.30 | 1458.21 |
| | | | 5 | 14.059 | 25.156 | 1880.70 | 1459.92 |
| 10 | 668.55 | .36142 | 1 | 16.856 | 24.179 | 1326.08 | 1262.43 |
| | | | 2 | 6.579 | 7.989 | 1398.49 | 1296.70 |
| | | | 3 | 6.346 | 8.035 | 1541.53 | 1358.56 |
| | | | 4 | 6.271 | 7.915 | 1766.95 | 1458.84 |
| | | | 5 | 13.976 | 24.075 | 1883.23 | 1460.57 |
| 11 | 663.65 | .35170 | 1 | 16.737 | 23.909 | 1326.42 | 1262.67 |
| | | | 2 | 6.549 | 7.943 | 1398.71 | 1297.00 |
| | | | 3 | 6.318 | 7.988 | 1541.94 | 1358.98 |
| | | | 4 | 6.243 | 7.870 | 1767.59 | 1459.47 |
| | | | 5 | 13.893 | 24.596 | 1885.77 | 1461.23 |
| 12 | 658.83 | .34216 | 1 | 16.618 | 23.639 | 1326.77 | 1262.92 |
| | | | 2 | 6.520 | 7.897 | 1398.93 | 1297.29 |
| | | | 3 | 6.291 | 7.943 | 1542.35 | 1359.39 |
| | | | 4 | 6.216 | 7.825 | 1768.22 | 1460.09 |
| | | | 5 | 13.808 | 24.318 | 1888.31 | 1461.88 |
| 13 | 654.08 | .33279 | 1 | 16.498 | 23.371 | 1327.11 | 1263.17 |
| | | | 2 | 6.491 | 7.853 | 1399.14 | 1297.58 |
| | | | 3 | 6.264 | 7.898 | 1542.75 | 1359.91 |
| | | | 4 | 6.189 | 7.781 | 1768.85 | 1460.72 |
| | | | 5 | 13.724 | 24.041 | 1890.86 | 1462.53 |
| 14 | 649.40 | .32358 | 1 | 16.378 | 23.193 | 1327.45 | 1263.43 |
| | | | 2 | 6.463 | 7.809 | 1399.36 | 1297.88 |
| | | | 3 | 6.237 | 7.854 | 1543.15 | 1360.22 |
| | | | 4 | 6.163 | 7.738 | 1769.47 | 1461.33 |
| | | | 5 | 13.638 | 23.765 | 1893.41 | 1463.17 |
| 15 | 644.80 | .31455 | 1 | 16.257 | 22.837 | 1327.80 | 1263.68 |
| | | | 2 | 6.434 | 7.765 | 1399.57 | 1298.17 |
| | | | 3 | 6.211 | 7.810 | 1543.55 | 1360.63 |
| | | | 4 | 6.137 | 7.695 | 1770.08 | 1461.95 |
| | | | 5 | 13.552 | 23.490 | 1895.97 | 1463.31 |
| 16 | 640.27 | .30568 | 1 | 16.135 | 22.572 | 1328.14 | 1263.93 |
| | | | 2 | 6.407 | 7.722 | 1399.78 | 1298.46 |
| | | | 3 | 6.185 | 7.767 | 1543.94 | 1361.04 |
| | | | 4 | 6.111 | 7.653 | 1770.68 | 1462.56 |
| | | | 5 | 13.466 | 23.216 | 1898.54 | 1464.45 |
| 17 | 635.81 | .29697 | 1 | 16.012 | 22.308 | 1328.48 | 1264.19 |
| | | | 2 | 6.379 | 7.680 | 1399.99 | 1298.76 |
| | | | 3 | 6.159 | 7.725 | 1544.33 | 1361.45 |
| | | | 4 | 6.086 | 7.611 | 1771.27 | 1463.16 |
| | | | 5 | 13.378 | 22.943 | 1901.11 | 1465.08 |
| 18 | 631.43 | .28842 | 1 | 15.889 | 22.045 | 1328.82 | 1264.44 |
| | | | 2 | 6.352 | 7.638 | 1400.19 | 1299.05 |
| | | | 3 | 6.134 | 7.683 | 1544.71 | 1361.86 |
| | | | 4 | 6.060 | 7.571 | 1771.86 | 1463.76 |
| | | | 5 | 13.290 | 22.672 | 1903.69 | 1465.71 |
| 19 | 627.11 | .28003 | 1 | 15.765 | 21.783 | 1329.15 | 1264.70 |
| | | | 2 | 6.326 | 7.598 | 1400.39 | 1299.34 |
| | | | 3 | 6.103 | 7.642 | 1545.08 | 1362.26 |
| | | | 4 | 6.036 | 7.530 | 1772.44 | 1464.36 |
| | | | 5 | 13.201 | 22.401 | 1906.28 | 1466.34 |
| 20 | 622.68 | .27179 | 1 | 15.640 | 21.522 | 1329.49 | 1264.96 |
| | | | 2 | 6.299 | 7.557 | 1400.60 | 1299.64 |
| | | | 3 | 6.084 | 7.601 | 1545.46 | 1362.66 |
| | | | 4 | 6.011 | 7.491 | 1773.01 | 1464.95 |
| | | | 5 | 13.111 | 22.131 | 1908.87 | 1466.96 |
| 21 | 618.71 | .26371 | 1 | 15.514 | 21.262 | 1329.83 | 1265.22 |
| | | | 2 | 6.273 | 7.518 | 1400.80 | 1299.93 |

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|--------|--------|---------|---------|
| | | | 3 | 6.059 | 7.561 | 1545.82 | 1363.06 |
| | | | 4 | 5.967 | 7.452 | 1773.58 | 1465.54 |
| | | | 5 | 13.021 | 21.862 | 1911.47 | 1467.58 |
| 22 | 614.62 | .25577 | 1 | 15.388 | 21.003 | 1330.17 | 1265.48 |
| | | | 2 | 6.248 | 7.479 | 1400.99 | 1300.22 |
| | | | 3 | 6.035 | 7.522 | 1546.19 | 1363.46 |
| | | | 4 | 5.963 | 7.413 | 1774.13 | 1466.13 |
| | | | 5 | 12.930 | 21.595 | 1914.08 | 1468.20 |
| 23 | 610.60 | .24799 | 1 | 15.261 | 20.745 | 1330.50 | 1265.74 |
| | | | 2 | 6.223 | 7.440 | 1401.19 | 1300.52 |
| | | | 3 | 6.012 | 7.484 | 1546.54 | 1363.86 |
| | | | 4 | 5.940 | 7.376 | 1774.68 | 1466.70 |
| | | | 5 | 12.838 | 21.327 | 1916.69 | 1468.91 |
| 24 | 606.65 | .24034 | 1 | 15.133 | 20.487 | 1330.83 | 1266.01 |
| | | | 2 | 6.195 | 7.403 | 1401.38 | 1300.91 |
| | | | 3 | 5.968 | 7.446 | 1546.90 | 1364.25 |
| | | | 4 | 5.916 | 7.339 | 1775.22 | 1467.28 |
| | | | 5 | 12.745 | 21.061 | 1919.32 | 1469.42 |
| 25 | 602.76 | .23264 | 1 | 15.004 | 20.231 | 1331.17 | 1266.27 |
| | | | 2 | 6.174 | 7.366 | 1401.57 | 1301.10 |
| | | | 3 | 5.965 | 7.409 | 1547.25 | 1364.64 |
| | | | 4 | 5.894 | 7.302 | 1775.75 | 1467.85 |
| | | | 5 | 12.651 | 20.796 | 1921.95 | 1470.02 |
| 26 | 598.98 | .22549 | 1 | 14.874 | 19.975 | 1331.50 | 1266.53 |
| | | | 2 | 6.150 | 7.329 | 1401.76 | 1301.39 |
| | | | 3 | 5.943 | 7.372 | 1547.59 | 1365.03 |
| | | | 4 | 5.871 | 7.267 | 1776.28 | 1468.41 |
| | | | 5 | 12.557 | 20.531 | 1924.59 | 1470.62 |
| 27 | 595.25 | .21827 | 1 | 14.743 | 19.720 | 1331.83 | 1266.80 |
| | | | 2 | 6.126 | 7.294 | 1401.95 | 1301.68 |
| | | | 3 | 5.921 | 7.336 | 1547.93 | 1365.42 |
| | | | 4 | 5.849 | 7.232 | 1776.79 | 1468.97 |
| | | | 5 | 12.461 | 20.267 | 1927.24 | 1471.21 |
| 28 | 591.60 | .21118 | 1 | 14.612 | 19.465 | 1332.16 | 1267.07 |
| | | | 2 | 6.103 | 7.259 | 1402.13 | 1301.98 |
| | | | 3 | 5.899 | 7.301 | 1548.27 | 1365.80 |
| | | | 4 | 5.827 | 7.197 | 1777.30 | 1469.52 |
| | | | 5 | 12.365 | 20.004 | 1929.90 | 1471.81 |
| 29 | 588.02 | .20424 | 1 | 14.479 | 19.212 | 1332.49 | 1267.34 |
| | | | 2 | 6.081 | 7.224 | 1402.31 | 1302.27 |
| | | | 3 | 5.877 | 7.267 | 1548.59 | 1366.18 |
| | | | 4 | 5.806 | 7.163 | 1777.80 | 1470.07 |
| | | | 5 | 12.268 | 19.742 | 1932.57 | 1472.39 |
| 30 | 584.51 | .19742 | 1 | 14.346 | 18.959 | 1332.82 | 1267.61 |
| | | | 2 | 6.059 | 7.191 | 1402.49 | 1302.56 |
| | | | 3 | 5.856 | 7.233 | 1548.92 | 1366.56 |
| | | | 4 | 5.785 | 7.130 | 1778.29 | 1470.61 |
| | | | 5 | 12.170 | 19.480 | 1935.24 | 1472.97 |
| 31 | 581.08 | .19074 | 1 | 14.212 | 18.706 | 1333.15 | 1267.88 |
| | | | 2 | 6.037 | 7.158 | 1402.67 | 1302.85 |
| | | | 3 | 5.835 | 7.200 | 1549.24 | 1366.94 |
| | | | 4 | 5.765 | 7.098 | 1778.77 | 1471.15 |
| | | | 5 | 12.071 | 19.219 | 1937.93 | 1473.55 |
| 32 | 577.72 | .18418 | 1 | 14.075 | 18.455 | 1333.48 | 1268.15 |
| | | | 2 | 6.015 | 7.126 | 1402.85 | 1303.14 |
| | | | 3 | 5.815 | 7.167 | 1549.55 | 1367.32 |
| | | | 4 | 5.744 | 7.066 | 1779.25 | 1471.68 |
| | | | 5 | 11.971 | 18.958 | 1940.63 | 1474.12 |
| 33 | 574.43 | .17776 | 1 | 13.940 | 18.203 | 1333.80 | 1268.42 |
| | | | 2 | 5.994 | 7.094 | 1403.02 | 1303.43 |
| | | | 3 | 5.795 | 7.135 | 1549.86 | 1367.69 |

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|--------|--------|---------|---------|
| | | | 4 | 5.725 | 7.035 | 1779.71 | 1472.20 |
| | | | 5 | 11.870 | 18.698 | 1943.35 | 1474.69 |
| 34 | 571.21 | .17145 | 1 | 13.803 | 17.953 | 1334.13 | 1268.70 |
| | | | 2 | 5.974 | 7.063 | 1403.19 | 1303.72 |
| | | | 3 | 5.776 | 7.104 | 1550.17 | 1368.06 |
| | | | 4 | 5.705 | 7.004 | 1780.17 | 1472.72 |
| | | | 5 | 11.768 | 18.438 | 1946.07 | 1475.25 |
| 35 | 568.07 | .16528 | 1 | 13.665 | 17.703 | 1334.46 | 1268.97 |
| | | | 2 | 5.954 | 7.033 | 1403.36 | 1304.01 |
| | | | 3 | 5.757 | 7.074 | 1550.47 | 1368.42 |
| | | | 4 | 5.686 | 6.975 | 1780.62 | 1473.24 |
| | | | 5 | 11.665 | 18.179 | 1948.81 | 1475.81 |
| 36 | 565.00 | .15922 | 1 | 13.525 | 17.453 | 1334.78 | 1269.25 |
| | | | 2 | 5.934 | 7.003 | 1403.53 | 1304.29 |
| | | | 3 | 5.738 | 7.044 | 1550.76 | 1368.79 |
| | | | 4 | 5.668 | 6.946 | 1781.06 | 1473.74 |
| | | | 5 | 11.561 | 17.921 | 1951.56 | 1476.37 |
| 37 | 562.01 | .15328 | 1 | 13.385 | 17.203 | 1335.10 | 1269.53 |
| | | | 2 | 5.915 | 6.974 | 1403.69 | 1304.58 |
| | | | 3 | 5.720 | 7.015 | 1551.05 | 1369.15 |
| | | | 4 | 5.649 | 6.917 | 1781.49 | 1474.24 |
| | | | 5 | 11.456 | 17.662 | 1954.32 | 1476.92 |
| 38 | 559.08 | .14747 | 1 | 13.243 | 16.955 | 1335.42 | 1269.81 |
| | | | 2 | 5.896 | 6.946 | 1403.85 | 1304.87 |
| | | | 3 | 5.702 | 6.987 | 1551.34 | 1369.51 |
| | | | 4 | 5.631 | 6.889 | 1781.91 | 1474.74 |
| | | | 5 | 11.350 | 17.404 | 1957.10 | 1477.46 |
| 39 | 556.24 | .14177 | 1 | 13.100 | 16.706 | 1335.75 | 1270.09 |
| | | | 2 | 5.878 | 6.919 | 1404.01 | 1305.16 |
| | | | 3 | 5.684 | 6.959 | 1551.62 | 1369.86 |
| | | | 4 | 5.614 | 6.862 | 1782.32 | 1475.23 |
| | | | 5 | 11.243 | 17.147 | 1959.89 | 1478.00 |
| 40 | 553.46 | .13619 | 1 | 12.956 | 16.458 | 1336.07 | 1270.37 |
| | | | 2 | 5.860 | 6.892 | 1404.17 | 1305.45 |
| | | | 3 | 5.667 | 6.932 | 1551.89 | 1370.22 |
| | | | 4 | 5.597 | 6.836 | 1782.73 | 1475.71 |
| | | | 5 | 11.135 | 16.890 | 1962.70 | 1478.54 |
| 41 | 550.76 | .13072 | 1 | 12.811 | 16.210 | 1336.39 | 1270.65 |
| | | | 2 | 5.843 | 6.866 | 1404.33 | 1305.73 |
| | | | 3 | 5.651 | 6.906 | 1552.16 | 1370.57 |
| | | | 4 | 5.581 | 6.810 | 1783.13 | 1476.19 |
| | | | 5 | 11.025 | 16.633 | 1965.52 | 1479.07 |
| 42 | 548.13 | .12537 | 1 | 12.665 | 15.962 | 1336.70 | 1270.94 |
| | | | 2 | 5.826 | 6.841 | 1404.48 | 1306.02 |
| | | | 3 | 5.634 | 6.880 | 1552.43 | 1370.91 |
| | | | 4 | 5.564 | 6.785 | 1783.51 | 1476.65 |
| | | | 5 | 10.914 | 16.376 | 1968.36 | 1479.59 |
| 43 | 545.57 | .12012 | 1 | 12.517 | 15.714 | 1337.02 | 1271.22 |
| | | | 2 | 5.810 | 6.816 | 1404.63 | 1306.30 |
| | | | 3 | 5.619 | 6.855 | 1552.69 | 1371.26 |
| | | | 4 | 5.549 | 6.761 | 1783.89 | 1477.11 |
| | | | 5 | 10.802 | 16.119 | 1971.22 | 1480.11 |
| 44 | 543.09 | .11499 | 1 | 12.368 | 15.466 | 1337.34 | 1271.51 |
| | | | 2 | 5.794 | 6.792 | 1404.78 | 1306.59 |
| | | | 3 | 5.603 | 6.831 | 1552.94 | 1371.60 |
| | | | 4 | 5.534 | 6.737 | 1784.26 | 1477.57 |
| | | | 5 | 10.689 | 15.863 | 1974.09 | 1480.63 |
| 45 | 540.68 | .10997 | 1 | 12.218 | 15.219 | 1337.66 | 1271.80 |
| | | | 2 | 5.779 | 6.769 | 1404.93 | 1306.87 |
| | | | 3 | 5.589 | 6.808 | 1553.19 | 1371.94 |
| | | | 4 | 5.519 | 6.714 | 1784.62 | 1478.02 |

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|--------|--------|---------|---------|
| 46 | 538.34 | .10505 | 5 | 10.574 | 15.606 | 1976.99 | 1481.14 |
| | | | 1 | 12.065 | 14.972 | 1337.97 | 1272.09 |
| | | | 2 | 5.764 | 6.746 | 1405.07 | 1307.16 |
| | | | 3 | 5.574 | 6.785 | 1553.43 | 1372.27 |
| | | | 4 | 5.504 | 6.692 | 1784.97 | 1478.46 |
| 47 | 536.07 | .10927 | 5 | 10.458 | 15.350 | 1979.90 | 1481.65 |
| | | | 1 | 11.913 | 14.724 | 1338.29 | 1272.38 |
| | | | 2 | 5.749 | 6.724 | 1405.21 | 1307.44 |
| | | | 3 | 5.560 | 6.763 | 1553.67 | 1372.60 |
| | | | 4 | 5.490 | 6.670 | 1785.32 | 1478.89 |
| 48 | 533.88 | .10458 | 5 | 10.341 | 15.094 | 1982.84 | 1482.15 |
| | | | 1 | 11.755 | 14.477 | 1338.60 | 1272.67 |
| | | | 2 | 5.735 | 6.703 | 1405.35 | 1307.73 |
| | | | 3 | 5.547 | 6.742 | 1553.91 | 1372.93 |
| | | | 4 | 5.477 | 6.650 | 1785.65 | 1479.32 |
| 49 | 531.77 | .09999 | 5 | 10.222 | 14.837 | 1985.79 | 1482.65 |
| | | | 1 | 11.502 | 14.229 | 1338.91 | 1272.97 |
| | | | 2 | 5.722 | 6.683 | 1405.49 | 1308.01 |
| | | | 3 | 5.534 | 6.721 | 1554.14 | 1373.26 |
| | | | 4 | 5.464 | 6.629 | 1785.98 | 1479.74 |
| 50 | 529.72 | .09551 | 5 | 10.102 | 14.581 | 1988.77 | 1483.14 |
| | | | 1 | 11.444 | 13.982 | 1339.22 | 1273.29 |
| | | | 2 | 5.709 | 6.663 | 1405.63 | 1308.26 |
| | | | 3 | 5.521 | 6.701 | 1554.36 | 1373.58 |
| | | | 4 | 5.451 | 6.610 | 1786.29 | 1480.15 |
| 51 | 527.75 | .09113 | 5 | 9.980 | 14.324 | 1991.77 | 1483.63 |
| | | | 1 | 11.265 | 13.734 | 1339.54 | 1273.56 |
| | | | 2 | 5.697 | 6.644 | 1405.76 | 1308.58 |
| | | | 3 | 5.509 | 6.682 | 1554.58 | 1373.90 |
| | | | 4 | 5.439 | 6.591 | 1786.60 | 1480.55 |
| 52 | 525.65 | .08886 | 5 | 9.857 | 14.068 | 1994.80 | 1484.12 |
| | | | 1 | 11.124 | 13.485 | 1339.85 | 1273.86 |
| | | | 2 | 5.685 | 6.626 | 1405.89 | 1308.36 |
| | | | 3 | 5.495 | 6.664 | 1554.79 | 1374.21 |
| | | | 4 | 5.427 | 6.573 | 1786.90 | 1480.95 |
| 53 | 524.63 | .08268 | 5 | 9.732 | 13.811 | 1997.86 | 1484.60 |
| | | | 1 | 10.961 | 13.237 | 1340.16 | 1274.16 |
| | | | 2 | 5.674 | 6.609 | 1406.02 | 1309.14 |
| | | | 3 | 5.486 | 6.646 | 1555.00 | 1374.52 |
| | | | 4 | 5.416 | 6.556 | 1787.19 | 1481.34 |
| 54 | 522.28 | .07850 | 5 | 9.605 | 13.553 | 2000.94 | 1485.08 |
| | | | 1 | 10.797 | 12.988 | 1340.46 | 1274.46 |
| | | | 2 | 5.663 | 6.592 | 1406.15 | 1309.42 |
| | | | 3 | 5.475 | 6.629 | 1555.20 | 1374.83 |
| | | | 4 | 5.405 | 6.539 | 1787.47 | 1481.73 |
| 55 | 520.60 | .07463 | 5 | 9.477 | 13.296 | 2004.05 | 1485.56 |
| | | | 1 | 10.631 | 12.739 | 1340.77 | 1274.76 |
| | | | 2 | 5.653 | 6.576 | 1406.28 | 1309.70 |
| | | | 3 | 5.466 | 6.613 | 1555.40 | 1375.14 |
| | | | 4 | 5.395 | 6.523 | 1787.74 | 1482.10 |
| 56 | 518.99 | .07075 | 5 | 9.347 | 13.038 | 2007.18 | 1486.03 |
| | | | 1 | 10.463 | 12.489 | 1341.08 | 1275.06 |
| | | | 2 | 5.643 | 6.560 | 1406.40 | 1309.98 |
| | | | 3 | 5.456 | 6.597 | 1555.59 | 1375.44 |
| | | | 4 | 5.385 | 6.508 | 1788.00 | 1482.47 |
| 57 | 517.46 | .06697 | 5 | 9.215 | 12.779 | 2010.35 | 1486.50 |
| | | | 1 | 10.293 | 12.239 | 1341.39 | 1275.37 |
| | | | 2 | 5.634 | 6.546 | 1406.52 | 1310.26 |
| | | | 3 | 5.447 | 6.583 | 1555.78 | 1375.74 |
| | | | 4 | 5.376 | 6.494 | 1788.25 | 1482.83 |
| | | | 5 | 9.081 | 12.520 | 2013.55 | 1486.96 |

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|--------|--------|---------|---------|
| 58 | 516.00 | .06328 | 1 | 10.121 | 11.988 | 1341.69 | 1275.69 |
| | | | 2 | 5.625 | 6.532 | 1406.64 | 1310.54 |
| | | | 3 | 5.438 | 6.569 | 1555.96 | 1376.03 |
| | | | 4 | 5.367 | 6.480 | 1788.50 | 1483.18 |
| | | | 5 | 5.945 | 12.261 | 2016.79 | 1487.43 |
| 59 | 514.62 | .05970 | 1 | 9.947 | 11.737 | 1342.00 | 1275.98 |
| | | | 2 | 5.617 | 6.519 | 1406.76 | 1310.92 |
| | | | 3 | 5.430 | 6.555 | 1556.13 | 1376.33 |
| | | | 4 | 5.359 | 6.467 | 1788.73 | 1483.52 |
| | | | 5 | 6.307 | 12.001 | 2020.06 | 1487.89 |
| 60 | 513.30 | .05621 | 1 | 9.771 | 11.484 | 1342.30 | 1276.30 |
| | | | 2 | 5.609 | 6.507 | 1406.88 | 1311.10 |
| | | | 3 | 5.422 | 6.543 | 1556.31 | 1376.62 |
| | | | 4 | 5.351 | 6.455 | 1788.95 | 1483.36 |
| | | | 5 | 6.667 | 11.740 | 2023.37 | 1488.35 |
| 61 | 512.07 | .05281 | 1 | 9.593 | 11.231 | 1342.61 | 1276.61 |
| | | | 2 | 5.602 | 6.495 | 1406.99 | 1311.38 |
| | | | 3 | 5.415 | 6.531 | 1556.47 | 1376.90 |
| | | | 4 | 5.343 | 6.443 | 1789.17 | 1434.19 |
| | | | 5 | 6.525 | 11.473 | 2026.72 | 1488.31 |
| 62 | 510.90 | .04952 | 1 | 9.412 | 10.977 | 1342.91 | 1276.92 |
| | | | 2 | 5.596 | 6.484 | 1407.10 | 1311.66 |
| | | | 3 | 5.408 | 6.520 | 1556.63 | 1377.18 |
| | | | 4 | 5.336 | 6.432 | 1789.38 | 1484.51 |
| | | | 5 | 6.381 | 11.216 | 2030.11 | 1489.27 |
| 63 | 509.61 | .04651 | 1 | 9.229 | 10.722 | 1343.22 | 1277.24 |
| | | | 2 | 5.590 | 6.474 | 1407.21 | 1311.94 |
| | | | 3 | 5.402 | 6.510 | 1556.79 | 1377.46 |
| | | | 4 | 5.336 | 6.422 | 1789.57 | 1434.33 |
| | | | 5 | 6.234 | 10.952 | 2033.54 | 1439.73 |
| 64 | 508.79 | .04321 | 1 | 9.044 | 10.466 | 1343.52 | 1277.56 |
| | | | 2 | 5.584 | 6.464 | 1407.32 | 1312.22 |
| | | | 3 | 5.396 | 6.500 | 1556.94 | 1377.74 |
| | | | 4 | 5.324 | 6.412 | 1789.76 | 1435.13 |
| | | | 5 | 6.085 | 10.688 | 2037.02 | 1490.19 |
| 65 | 507.64 | .04019 | 1 | 8.856 | 10.209 | 1343.82 | 1277.87 |
| | | | 2 | 5.579 | 6.456 | 1407.42 | 1312.50 |
| | | | 3 | 5.391 | 6.491 | 1557.09 | 1378.01 |
| | | | 4 | 5.318 | 6.404 | 1789.94 | 1435.43 |
| | | | 5 | 7.934 | 10.422 | 2040.54 | 1490.66 |
| 66 | 506.97 | .03728 | 1 | 8.666 | 9.951 | 1344.12 | 1278.20 |
| | | | 2 | 5.575 | 6.448 | 1407.53 | 1312.78 |
| | | | 3 | 5.386 | 6.483 | 1557.23 | 1378.28 |
| | | | 4 | 5.313 | 6.396 | 1790.11 | 1435.72 |
| | | | 5 | 7.779 | 10.156 | 2044.11 | 1491.12 |
| 67 | 506.17 | .03446 | 1 | 8.473 | 9.691 | 1344.42 | 1278.52 |
| | | | 2 | 5.571 | 6.441 | 1407.63 | 1313.06 |
| | | | 3 | 5.382 | 6.476 | 1557.36 | 1378.55 |
| | | | 4 | 5.309 | 6.389 | 1790.27 | 1436.00 |
| | | | 5 | 7.623 | 9.888 | 2047.74 | 1491.59 |
| 68 | 505.44 | .03173 | 1 | 8.277 | 9.430 | 1344.72 | 1278.85 |
| | | | 2 | 5.568 | 6.434 | 1407.73 | 1313.33 |
| | | | 3 | 5.376 | 6.469 | 1557.49 | 1378.81 |
| | | | 4 | 5.305 | 6.382 | 1790.43 | 1436.28 |
| | | | 5 | 7.463 | 9.619 | 2051.42 | 1492.07 |
| 69 | 504.79 | .02910 | 1 | 8.078 | 9.157 | 1345.03 | 1279.17 |
| | | | 2 | 5.566 | 6.429 | 1407.83 | 1313.61 |
| | | | 3 | 5.375 | 6.463 | 1557.62 | 1379.07 |
| | | | 4 | 5.301 | 6.376 | 1790.57 | 1486.54 |
| | | | 5 | 7.308 | 9.348 | 2055.16 | 1492.55 |
| 70 | 504.21 | .02656 | 1 | 7.876 | 8.903 | 1345.33 | 1279.51 |

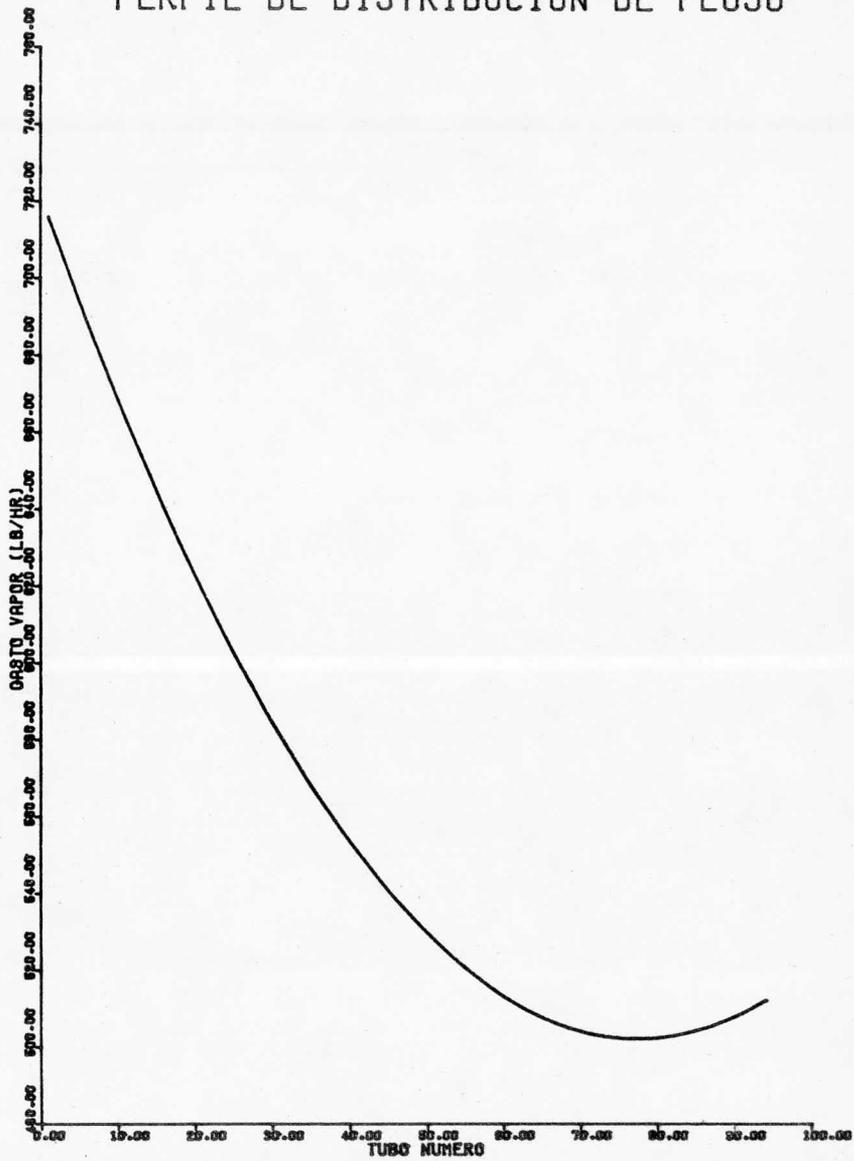
| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|-------|-------|---------|---------|
| | | | 2 | 5.564 | 6.424 | 1407.93 | 1313.89 |
| | | | 3 | 5.372 | 6.458 | 1557.74 | 1379.33 |
| | | | 4 | 5.298 | 6.371 | 1790.70 | 1486.80 |
| | | | 5 | 7.134 | 9.076 | 2056.97 | 1493.05 |
| 71 | 503.71 | .02412 | 1 | 7.671 | 8.637 | 1345.63 | 1279.84 |
| | | | 2 | 5.562 | 6.420 | 1408.02 | 1314.17 |
| | | | 3 | 5.370 | 6.454 | 1557.86 | 1379.58 |
| | | | 4 | 5.296 | 6.367 | 1790.83 | 1487.06 |
| | | | 5 | 6.965 | 8.803 | 2062.83 | 1493.55 |
| 72 | 503.27 | .02176 | 1 | 7.463 | 8.369 | 1345.93 | 1280.17 |
| | | | 2 | 5.561 | 6.416 | 1408.12 | 1314.45 |
| | | | 3 | 5.368 | 6.450 | 1557.97 | 1379.83 |
| | | | 4 | 5.294 | 6.363 | 1790.95 | 1487.30 |
| | | | 5 | 6.792 | 8.527 | 2066.77 | 1494.07 |
| 73 | 502.91 | .01953 | 1 | 7.251 | 8.100 | 1346.23 | 1280.51 |
| | | | 2 | 5.561 | 6.414 | 1408.21 | 1314.73 |
| | | | 3 | 5.367 | 6.447 | 1558.08 | 1380.08 |
| | | | 4 | 5.292 | 6.361 | 1791.05 | 1487.54 |
| | | | 5 | 6.616 | 8.250 | 2070.78 | 1494.60 |
| 74 | 502.65 | .01750 | 1 | 7.036 | 7.828 | 1346.53 | 1280.85 |
| | | | 2 | 5.561 | 6.412 | 1408.30 | 1315.01 |
| | | | 3 | 5.367 | 6.445 | 1558.18 | 1380.33 |
| | | | 4 | 5.291 | 6.359 | 1791.15 | 1487.76 |
| | | | 5 | 6.436 | 7.970 | 2074.86 | 1495.15 |
| 75 | 502.41 | .01532 | 1 | 6.816 | 7.553 | 1346.83 | 1281.20 |
| | | | 2 | 5.562 | 6.410 | 1408.39 | 1315.30 |
| | | | 3 | 5.367 | 6.444 | 1558.27 | 1380.57 |
| | | | 4 | 5.291 | 6.357 | 1791.24 | 1487.99 |
| | | | 5 | 6.252 | 7.639 | 2079.03 | 1495.73 |
| 76 | 502.27 | .01357 | 1 | 6.593 | 7.276 | 1347.13 | 1281.54 |
| | | | 2 | 5.564 | 6.410 | 1408.48 | 1315.58 |
| | | | 3 | 5.367 | 6.443 | 1558.37 | 1380.81 |
| | | | 4 | 5.291 | 6.357 | 1791.32 | 1488.20 |
| | | | 5 | 6.064 | 7.405 | 2083.28 | 1496.33 |
| 77 | 502.21 | .01151 | 1 | 6.365 | 6.997 | 1347.43 | 1281.89 |
| | | | 2 | 5.565 | 6.411 | 1408.56 | 1315.86 |
| | | | 3 | 5.368 | 6.443 | 1558.45 | 1381.05 |
| | | | 4 | 5.291 | 6.357 | 1791.39 | 1488.41 |
| | | | 5 | 5.872 | 7.119 | 2087.63 | 1496.97 |
| 78 | 502.21 | .00976 | 1 | 6.134 | 6.715 | 1347.73 | 1282.25 |
| | | | 2 | 5.568 | 6.412 | 1408.65 | 1316.15 |
| | | | 3 | 5.370 | 6.444 | 1558.54 | 1381.28 |
| | | | 4 | 5.292 | 6.358 | 1791.46 | 1488.61 |
| | | | 5 | 5.674 | 6.830 | 2092.07 | 1497.65 |
| 79 | 502.36 | .00816 | 1 | 5.897 | 6.429 | 1348.03 | 1282.60 |
| | | | 2 | 5.571 | 6.414 | 1408.73 | 1316.43 |
| | | | 3 | 5.372 | 6.446 | 1558.62 | 1381.52 |
| | | | 4 | 5.294 | 6.359 | 1791.51 | 1488.80 |
| | | | 5 | 5.472 | 6.538 | 2096.62 | 1498.38 |
| 80 | 502.45 | .00635 | 1 | 5.655 | 6.140 | 1348.33 | 1282.96 |
| | | | 2 | 5.575 | 6.416 | 1408.81 | 1316.72 |
| | | | 3 | 5.374 | 6.449 | 1558.69 | 1381.75 |
| | | | 4 | 5.296 | 6.362 | 1791.56 | 1488.99 |
| | | | 5 | 5.265 | 6.242 | 2101.28 | 1499.17 |
| 81 | 502.63 | .00510 | 1 | 5.408 | 5.848 | 1348.63 | 1283.33 |
| | | | 2 | 5.580 | 6.420 | 1408.90 | 1317.01 |
| | | | 3 | 5.377 | 6.452 | 1558.76 | 1381.98 |
| | | | 4 | 5.298 | 6.365 | 1791.59 | 1489.17 |
| | | | 5 | 5.052 | 5.944 | 2106.07 | 1500.04 |
| 82 | 502.98 | .00375 | 1 | 5.156 | 5.552 | 1348.93 | 1283.70 |
| | | | 2 | 5.565 | 6.424 | 1408.98 | 1317.30 |

| | | | | | | | |
|----|--------|---------|---|-------|-------|---------|---------|
| | | | 3 | 5.381 | 6.456 | 1558.83 | 1362.21 |
| | | | 4 | 5.301 | 6.369 | 1791.62 | 1439.34 |
| | | | 5 | 4.833 | 5.642 | 2110.98 | 1501.00 |
| 83 | 503.35 | -.00251 | 1 | 4.897 | 5.251 | 1349.24 | 1284.07 |
| | | | 2 | 5.590 | 6.429 | 1409.06 | 1317.60 |
| | | | 3 | 5.365 | 6.460 | 1558.89 | 1392.44 |
| | | | 4 | 5.305 | 6.373 | 1791.64 | 1439.51 |
| | | | 5 | 4.607 | 5.336 | 2116.04 | 1502.07 |
| 84 | 503.80 | .00138 | 1 | 4.632 | 4.946 | 1349.54 | 1234.45 |
| | | | 2 | 5.597 | 6.435 | 1409.14 | 1317.99 |
| | | | 3 | 5.399 | 6.466 | 1558.95 | 1382.67 |
| | | | 4 | 5.309 | 6.378 | 1791.65 | 1439.67 |
| | | | 5 | 4.375 | 5.025 | 2121.25 | 1503.30 |
| 85 | 504.32 | .00056 | 1 | 4.360 | 4.635 | 1349.85 | 1284.84 |
| | | | 2 | 5.504 | 6.441 | 1409.21 | 1313.19 |
| | | | 3 | 5.395 | 6.472 | 1559.00 | 1382.89 |
| | | | 4 | 5.314 | 6.395 | 1791.66 | 1439.33 |
| | | | 5 | 4.135 | 4.710 | 2126.64 | 1504.72 |
| 86 | 504.91 | -.00055 | 1 | 4.030 | 4.319 | 1350.16 | 1235.23 |
| | | | 2 | 5.611 | 6.448 | 1409.29 | 1318.50 |
| | | | 3 | 5.401 | 6.479 | 1559.05 | 1383.12 |
| | | | 4 | 5.319 | 6.391 | 1791.65 | 1439.29 |
| | | | 5 | 3.887 | 4.389 | 2132.21 | 1506.39 |
| 87 | 505.53 | -.00184 | 1 | 3.792 | 3.996 | 1350.47 | 1235.63 |
| | | | 2 | 5.619 | 6.456 | 1409.37 | 1318.31 |
| | | | 3 | 5.403 | 6.487 | 1559.10 | 1383.35 |
| | | | 4 | 5.325 | 6.399 | 1791.64 | 1439.13 |
| | | | 5 | 3.829 | 4.052 | 2137.99 | 1508.41 |
| 88 | 506.32 | -.00262 | 1 | 3.495 | 3.666 | 1350.79 | 1236.93 |
| | | | 2 | 5.628 | 6.465 | 1409.45 | 1319.12 |
| | | | 3 | 5.414 | 6.496 | 1559.14 | 1383.59 |
| | | | 4 | 5.331 | 6.407 | 1791.62 | 1439.27 |
| | | | 5 | 3.332 | 3.729 | 2144.01 | 1510.91 |
| 89 | 507.13 | -.00258 | 1 | 3.167 | 3.328 | 1351.10 | 1236.45 |
| | | | 2 | 5.637 | 6.475 | 1409.53 | 1319.44 |
| | | | 3 | 5.422 | 6.505 | 1559.19 | 1383.31 |
| | | | 4 | 5.338 | 6.416 | 1791.60 | 1439.41 |
| | | | 5 | 3.064 | 3.338 | 2150.30 | 1514.11 |
| 90 | 508.62 | -.00562 | 1 | 2.367 | 2.930 | 1351.43 | 1236.39 |
| | | | 2 | 5.647 | 6.485 | 1409.60 | 1319.77 |
| | | | 3 | 5.430 | 6.515 | 1559.22 | 1384.04 |
| | | | 4 | 5.345 | 6.426 | 1791.56 | 1439.55 |
| | | | 5 | 2.793 | 3.038 | 2156.91 | 1513.37 |
| 91 | 508.96 | -.00353 | 1 | 2.554 | 2.621 | 1351.75 | 1237.32 |
| | | | 2 | 5.653 | 6.496 | 1409.69 | 1320.10 |
| | | | 3 | 5.439 | 6.526 | 1559.26 | 1384.28 |
| | | | 4 | 5.353 | 6.437 | 1791.53 | 1439.69 |
| | | | 5 | 2.582 | 2.789 | 2168.07 | 1524.40 |
| 92 | 510.01 | -.00353 | 1 | 2.184 | 2.249 | 1352.09 | 1237.78 |
| | | | 2 | 5.670 | 6.508 | 1409.77 | 1320.45 |
| | | | 3 | 5.448 | 6.533 | 1559.30 | 1384.53 |
| | | | 4 | 5.361 | 6.448 | 1791.48 | 1439.32 |
| | | | 5 | 2.248 | 2.401 | 2168.13 | 1533.61 |
| 93 | 511.12 | -.00356 | 1 | 1.815 | 1.859 | 1352.43 | 1238.26 |
| | | | 2 | 5.682 | 6.521 | 1409.85 | 1320.32 |
| | | | 3 | 5.458 | 6.550 | 1559.34 | 1384.78 |
| | | | 4 | 5.370 | 6.461 | 1791.43 | 1439.97 |
| | | | 5 | 1.894 | 1.999 | 2176.96 | 1549.54 |
| 94 | 512.30 | -.00350 | 1 | 1.419 | 1.446 | 1352.79 | 1238.76 |
| | | | 2 | 5.695 | 6.535 | 1409.95 | 1321.20 |
| | | | 3 | 5.468 | 6.564 | 1559.38 | 1385.06 |

| | | | | | | | |
|----|--------|----------|---|-------|-------|---------|---------|
| 95 | 513.56 | - .00402 | 4 | 5.379 | 6.473 | 1791.38 | 1491.12 |
| | | | 5 | 1.517 | 1.579 | 2187.10 | 1584.10 |
| | | | 1 | .987 | .999 | 1353.17 | 1289.32 |
| | | | 2 | 5.709 | 6.549 | 1410.05 | 1321.63 |
| | | | 3 | 5.479 | 6.578 | 1559.42 | 1385.36 |
| | | | 4 | 5.389 | 6.487 | 1791.32 | 1491.29 |
| | | | 5 | 1.134 | 1.161 | 2201.07 | 1717.42 |

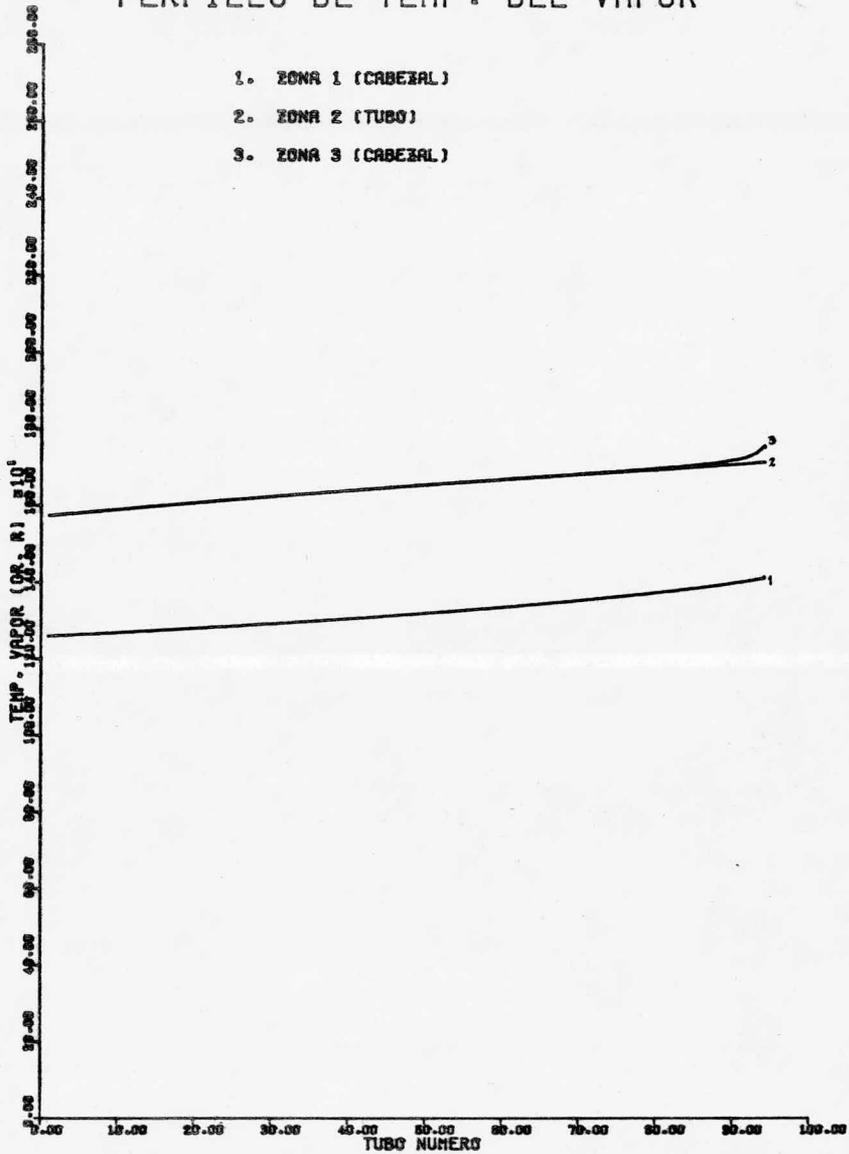
DFIN

PERFIL DE DISTRIBUCION DE FLUJO



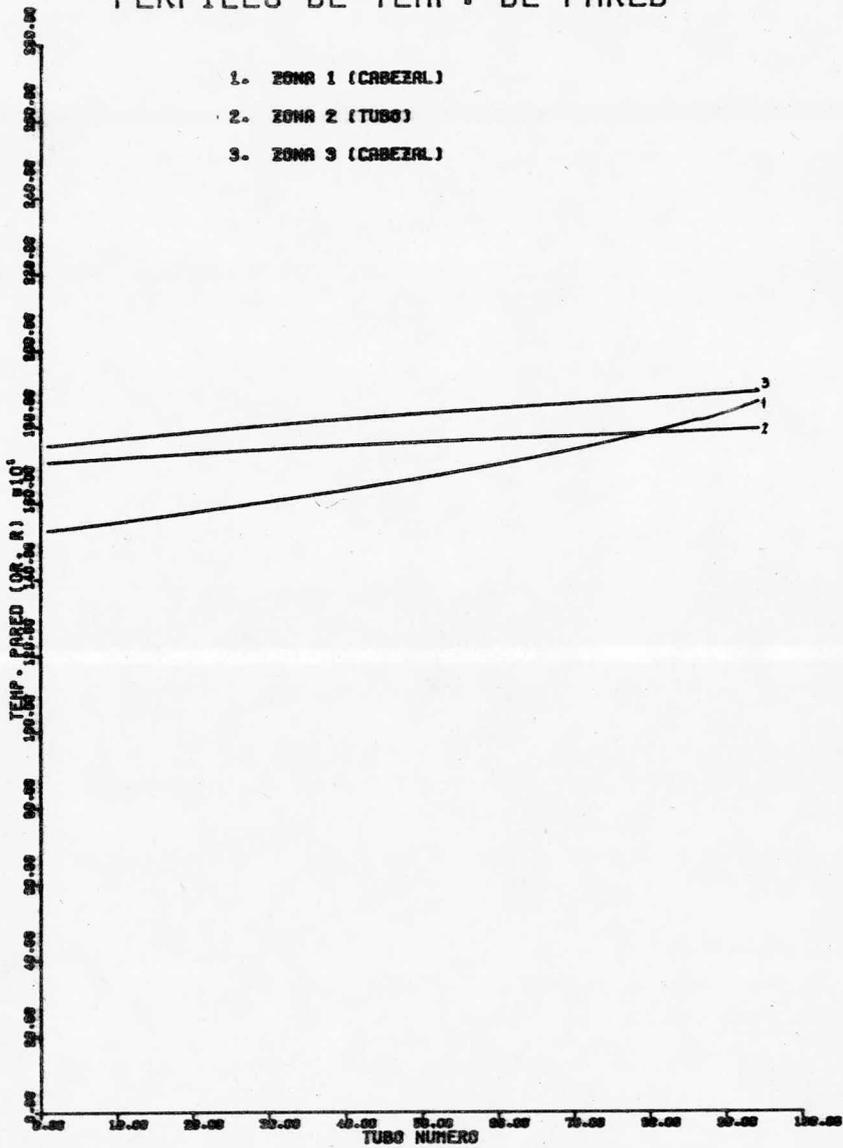
PERFILES DE TEMP. DEL VAPOR

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (CABEZAL)



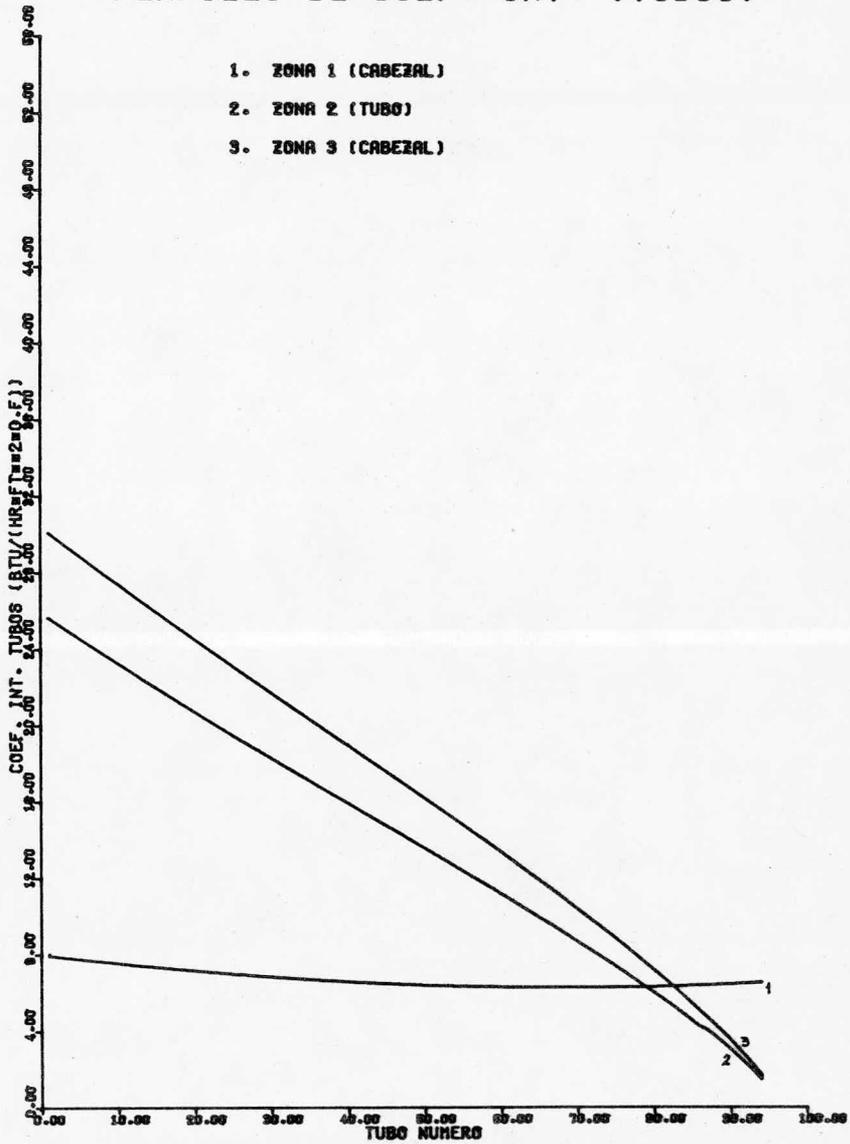
PERFILES DE TEMP. DE PARED

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (CABEZAL)



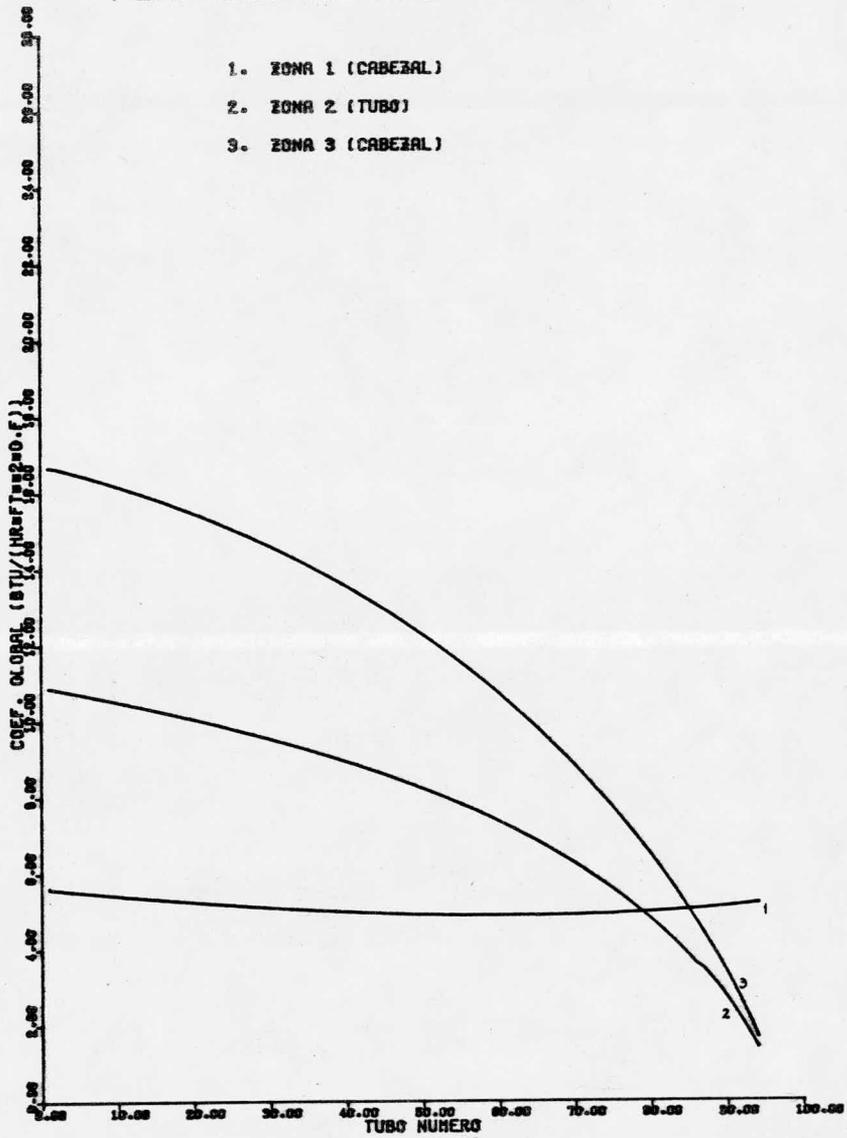
PERFILES DE COEF. INT. (TUBOS)

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (CABEZAL)

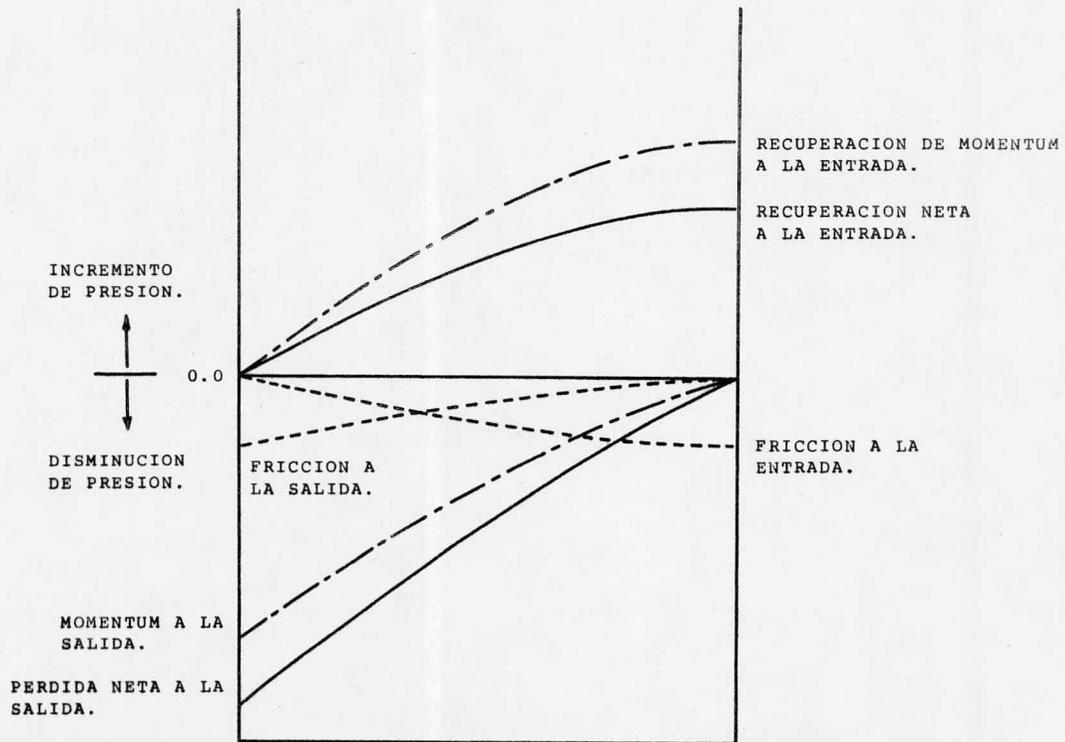


PERFILES DE COEF. GLOBAL

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (CABEZAL)

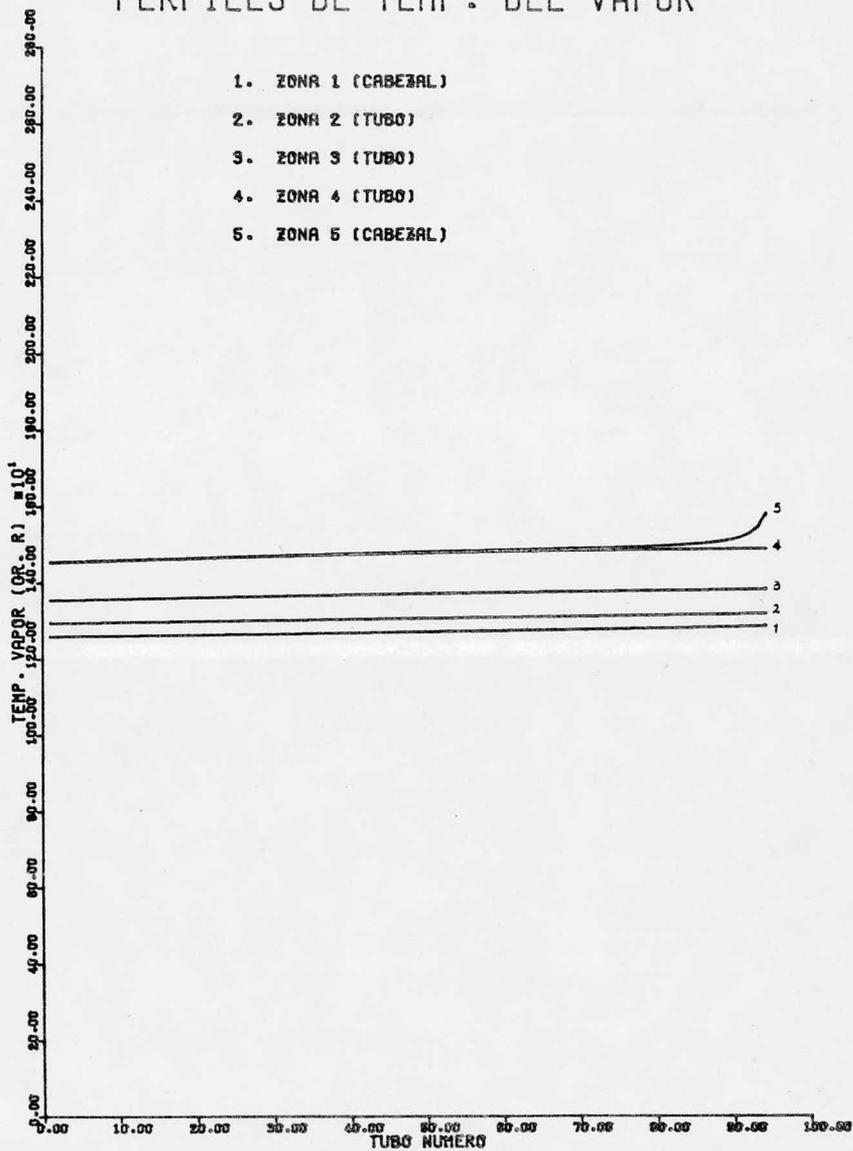


PERFIL DE CAIDA DE PRESION.



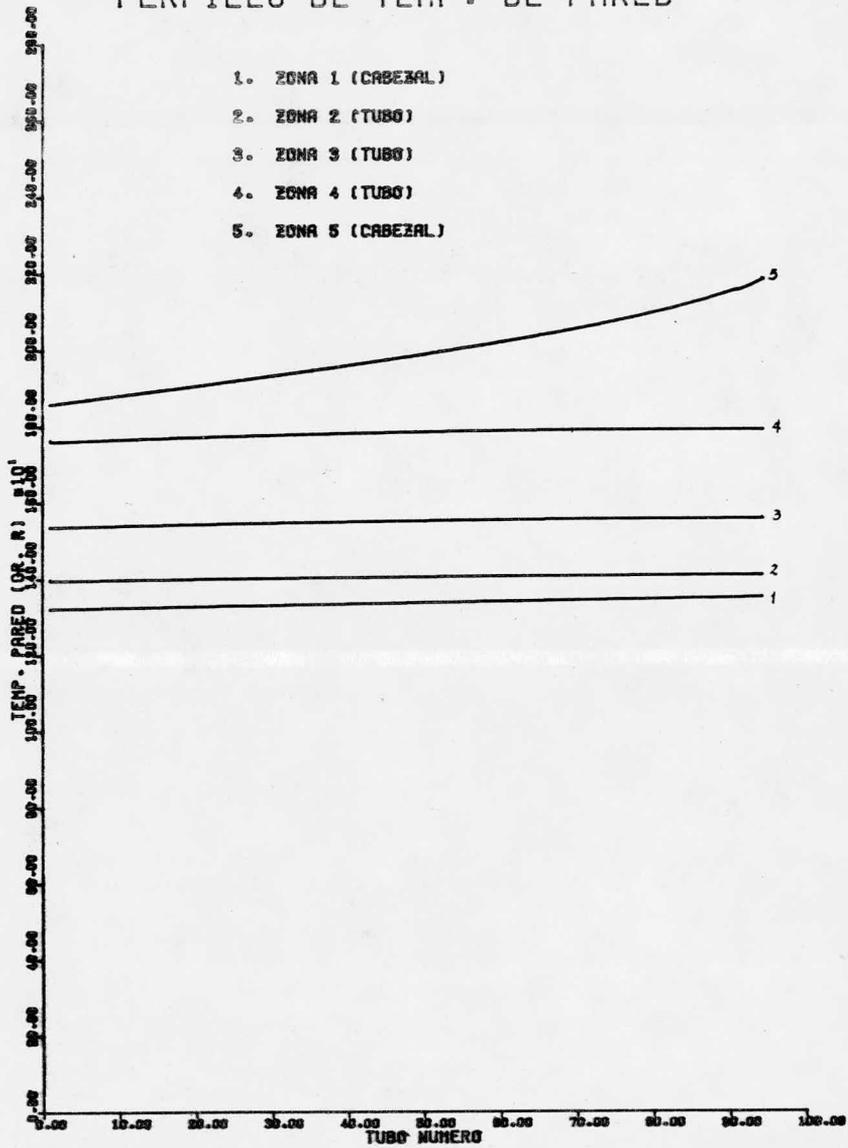
PERFILES DE TEMP. DEL VAPOR

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (TUBO)
- 4. ZONA 4 (TUBO)
- 5. ZONA 5 (CABEZAL)



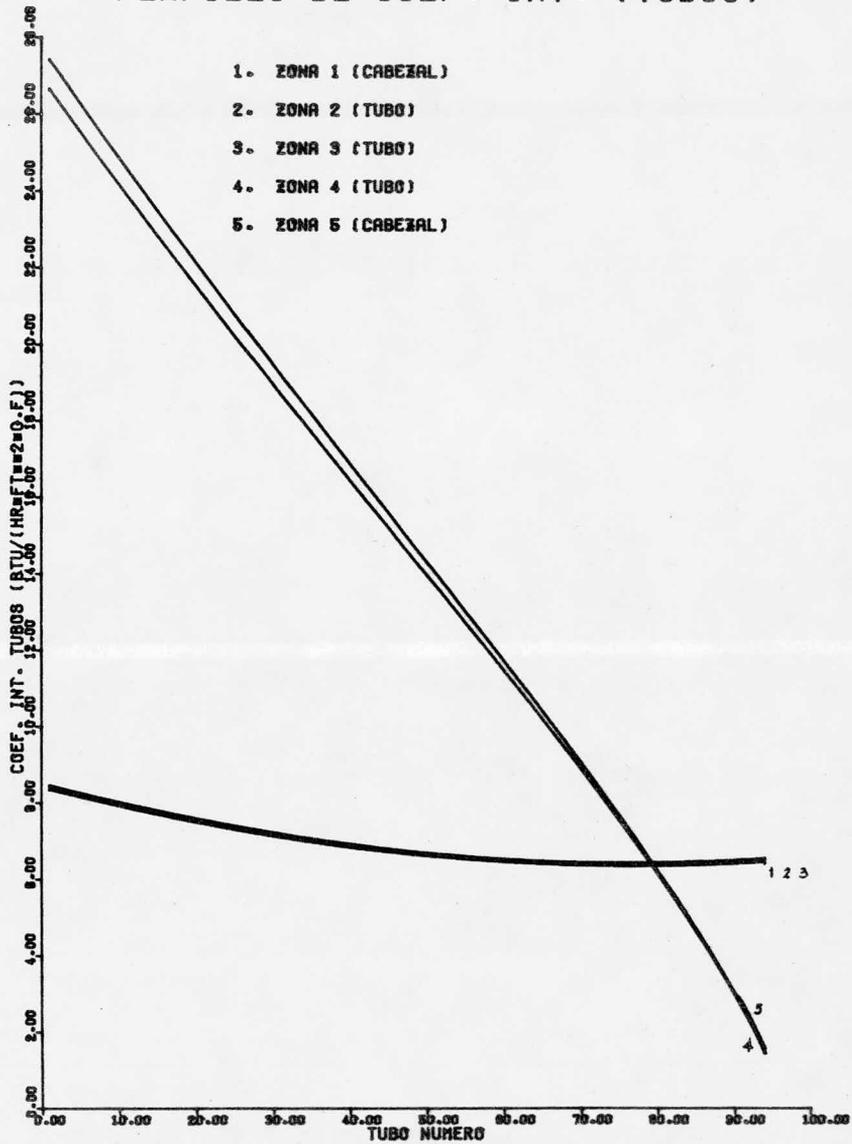
PERFILES DE TEMP. DE PARED

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (TUBO)
- 4. ZONA 4 (TUBO)
- 5. ZONA 5 (CABEZAL)



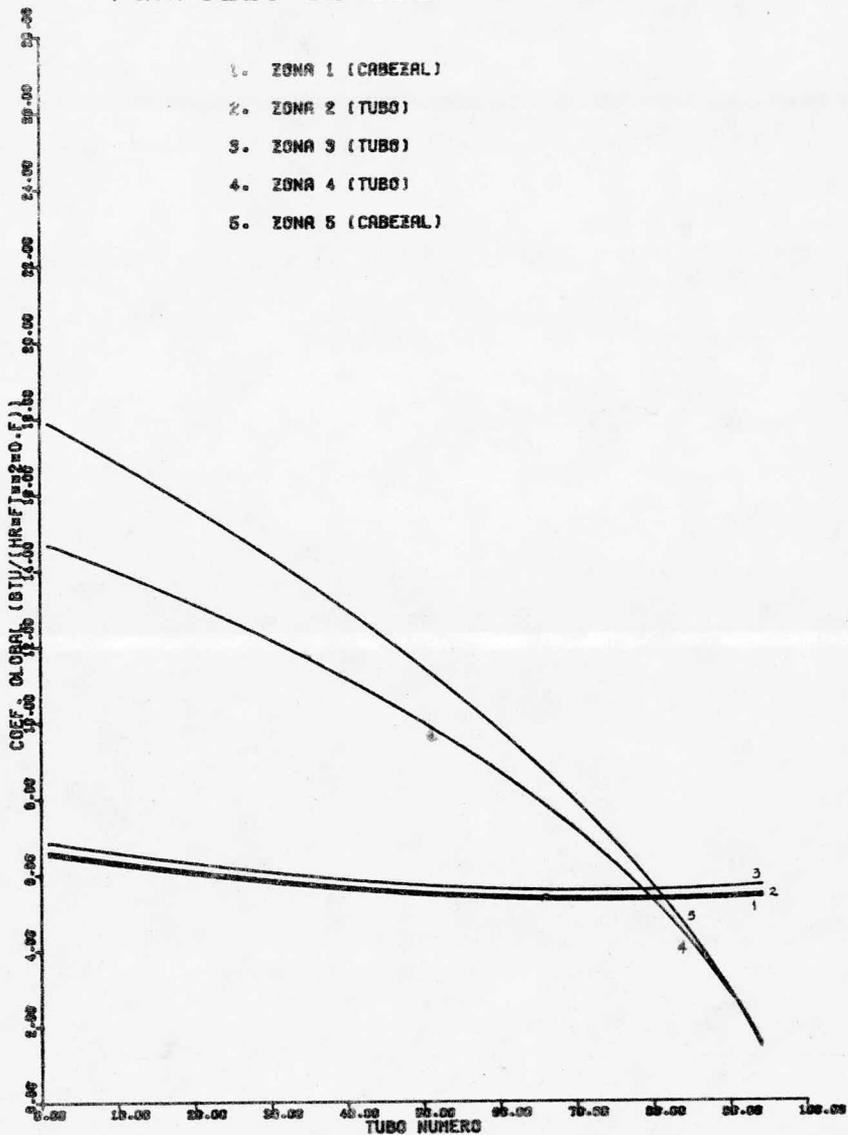
PERFILES DE COEF. INT. (TUBOS)

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (TUBO)
- 4. ZONA 4 (TUBO)
- 5. ZONA 5 (CABEZAL)



PERFILES DE COEF. GLOBAL

- 1. ZONA 1 (CABEZAL)
- 2. ZONA 2 (TUBO)
- 3. ZONA 3 (TUBO)
- 4. ZONA 4 (TUBO)
- 5. ZONA 5 (CABEZAL)



11. CONCLUSIONES

a) El modelo está implementado para el manejo de una sola con figuración geométrica; la cual corresponde a la presentada en la fig. A.

b) Según se pudo observar de una serie de problemas analiza- dos, la convergencia en cuanto a la distribución de flujo se refie- re, es más acelerada si se dispone de más de 50 y menos de 160 tra- yectorias de flujo en el sistema que se pretende diseñar y/o simu- lar.

c) Las figuras 18 a 31 muestran patrones para un estimado rá- pido de la maldistribución de flujo en la mayoría de los diseños de cabezales. Estas curvas típicas se derivan de los resultados de cálculo en la computadora con un método simplificado que se i- lustra en el texto del presente trabajo. Se presentan grupos de curvas tanto para factores de corrección de momentum (K_D ó K_C) constantes como para factores dependientes de flujo, haciendo uso para todas ellas de los valores de 0.6 y 1.0 para el coeficiente de descarga en el orificio en cabezales de descarga y colección respectivamente.

Con objeto de acelerar la convergencia de la distribución de flujo, los valores obtenidos de las mencionadas gráficas constitu- yen un primer estimado a usar ^{en} el método riguroso de solución im- plementado en el programa de computadora.

d) En el problema que se analizó se obtuvo una maldistribución de flujo de +17 a -6% respecto al flujo promedio, una caída de presión promedio por tubo recto de 2.1 psi y una caída de presión total promedio de 10.9 psi. Los valores de los anteriores parámetros fueron los que se obtuvieron mediante una optimización empírica y no se pudieron mejorar debido a que se tenía fijo el número de tubos.

Queda como trabajo a desarrollar la implementación de un al- goritmo de optimización ya sea en base a costos o a variables de proceso, para poder determinar el sistema más económico y/o el que satisfaga los requerimientos del proceso.

e) Aunque en este problema se obtuvo un comportamiento satisfactorio, con el presente método es posible detectar mediante los perfiles generados, aquellos tubos que están sujetos a condiciones extremas como son: temperaturas de pared más altas que las permitidas por el material o tubos con muy poco flujo, lo cual determina el reemplazo continuo de los mismos.

f) La principal desventaja del modelo desarrollado es que está basado en el análisis de flujos que no están totalmente estabilizados y para los cuales las constantes de las fórmulas están basadas en una cantidad limitada de resultados experimentales.

12. NOMENCLATURA.

| PARAMETRO | UNIDADES | |
|-----------------|---|--|
| A | Area de sección transversal | ft ² |
| C _c | Coficiente de contracción | - |
| C | Coficiente de descarga de orificio | - |
| C _f | Factor de corrección para caída de presión friccional. | - |
| d | Diámetro interno ó diámetro equivalente de la rama lateral. | ft |
| D | Diámetro interno ó equivalente (4 X radio hidráulico) del cabezal, para conductos de sección transversal ordinaria. | ft |
| f | Factor de fricción, definición de Fanning | - |
| F | Parámetro de factor de fricción - $\frac{f}{2^{5/2} \alpha C}$ | - |
| g | Aceleración local debida a la gravedad | ft/seg ² |
| g _c | Factor de conversión (constante dimensional | 32.17 $\frac{\text{lbft}}{\text{lb}_f \text{seg}^2}$ |
| H | Cabeza estática | ft |
| k | Factor de corrección de momentum | - |
| K | Coficiente de Pérdida | - |
| L | Longitud de cabezal analizada | ft |
| n | Número de ramas laterales | - |
| N _{RE} | Número de Reynolds | - |
| p | Presión estática | lb _f /ft ² |
| P | Cambio de presión adimensional | - |
| v | Velocidad (promedio) | ft/seg |
| V | Velocidad adimensional | - |
| W | Flujo másico total | lb/seg |
| y | Parámetro geométrico del cabezal | $\frac{1.41 C_d^2}{D^2}$ |
| Y | Parámetro de distancia adimensional | $\frac{1.41 C_d^2}{D^2} \times n$ |

LETRAS GRIEGAS:

| PARAMETRO | | UNIDADES |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| α | Angulo entre cabezal y rama lateral en la conexión. | - |
| β | Angulo entre cabezal y rama lateral en la conexión. | - |
| γ | Peso específico | lb _f /ft ² |
| δ | Angulo entre cabezal y rama lateral en la conexión. | - |
| Δx | Longitud de cabezal entre conexiones sucesivas de rama lateral. | ft |
| $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ | Factores de corrección por caída de presión en ramas laterales inclinadas. | - |
| ρ | Densidad del fluido de proceso | lb/ft ³ |
| σ | $\frac{A_B}{A_U}$ | |

SUBINDICES:

| | |
|-------------|--|
| prom | Promedio |
| B | Ramal lateral |
| B1, B2, etc | Primera, segunda, etc., rama lateral a partir del extremo abierto del cabezal. |
| c | Convergencia de flujo |
| d | División de flujo. |

13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

1. BUTTERWORTH, D., COWAN, G.H. GLASTONBURY, A.G. y ST. PIERRE, C.C. "Single phase flow distribution in multi-tube banks." AERE-R 6763, (1971).
2. ST. PIERRE, C.C. y GLASTONBURY, A.G. "Pressure changes for two phase flow across single T-junctions." AERE-R 7131, (1972)
3. GLASTONBURY, A.G. y ST. PIERRE, C.C. "Flow distribution in single and two phase flow in an 8-tube manifold." AERE-R 7239, (1972).
4. VAZSONYI, A. "Pressure loss in elbows y duct branches." Annual meeting of the Am. Soc. Mech. Engrs. Nov. 29-Dic 3, 1943. Trans. ASME, Vol. 66, págs. 177-183 (1944).
5. McNOWN, J.S. "Mechanics of Manifold flow." Trans. ASCE, Vol. 119, págs. 1103-1142, Paper No. 2714 (1954).
6. ZENZ, F.A. "Minimize Manifold Pressure Drop." Hydrocarbon processing y Petroleum Refiner, Vol. 41, No. 12, págs. 125-130 (1962).
7. ACRIVOS, A., BEBOCK, B.D. y PIGFORD, F.L. "Flow distribution in manifolds." Chem. Eng. Sci., Vol. 10, págs. 112-124 (1959).
8. BAJURE, R.A. "A model for flow distribution in manifolds." J. of Eng. for Power (Trans. of the ASME), págs. 7-12(1971).
9. ST. PIERRE, C.C. y GLASTONBURY, A.G. "Pressure changes for two-phase flow across single junctions." AERE-R 6764, (1971).
10. PERRY, J.H. Chemical Engineers Handbook (4a. Ed.). a) BOUCHER, D.F. y ALVES, G.E. "Fluid and Particle Mechanics." Sección 5.
11. ROUSE, H. "Engineering Hydraulics" (pág. 437), J. Wiley and Sons.
12. SOUCEK, E. y ZELNICK, E.W. Trans. Amer. Soc. Civil Engrs. Vol. 110, págs. 1357-1400, (1945).
13. McNOWN, J.S. y HSU, E.Y. Application of Dynamics Proceedings, Midwestern Conference on Fluid Dynamics, J.W. Edward, Ann Arbor, Mich., págs. 143-153 (1951).
14. KEENAN y NEUMANN, J. App. Mech. A 91-A100 (1946).

15. KAYS, Transaction Am. Soc. Mech. Engrs., págs. 1067-1074 (1950).
16. GROBMAN, DITTRICH, GRAVES, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., págs. 1601-1607 (1957).
17. ESCOBER, J. "Studies of manifold flow." M. Sc. Thesis, Univ. of Iowa (1946).
18. BARTON, J.R. "A study of diverging flow in pipe lines" M. Sc. Thesis, Univ. of Iowa (1946).
19. VILLEMONTTE, J.R. "Some basic concepts on flow in branching conduits." ASCE. J. Hydraulic Div., Vol. 103, No. 7 Págs. 685-697 (1977).
20. YANES, A. "Studies of multiple laterals in manifold flow." M. Sc. Thesis, Univ. of Iowa (1946).
21. NIAZ, S.M. "A study of converging flow in pipe lines." M. Sc. Thesis, Univ. of Iowa (1947).
22. HECKER, G.E. NYSTROM, J.B., QURESHI, N.A. "Effect of Branch Spacing on Losses for Dividing flow." ASCE. J. Hydraulic Div., Vol. 103, No. 3, págs. 265-279, (1977).
23. CRISI, J.S. "Make plate to guide header flow." Hydrocarbon Processing, (Sept. 1973).
24. HOOPES, J.W., ISAKOFF, S.E., CLARKE, J.J. y DREW, T.B. "Friction losses in screwed iron tees." C.E.P. 44, No. 9, págs. 691-696 (1948).
25. SIMPSON, L.L. "Process piping: Functional desing." Chem. Eng. Deskbook Issue, págs. 178-180 (Abril 14, 1969).
26. SENEAL, V.E. "Fluid distribution in process equipment." Ind. Eng. Chem. Vol. 49, No. 6, p^ags. 993-997 (Junio 1957).
27. CRANE CO. "Flow of fluids through valves, fittings and pipe." Tech. Paper No. 40, 41005 Kedzie Avenue, Chicago, Ill. 60632.
28. IDELCHIK, I.E. Handbook of hydraulic resistance. "Coefficients of Local Resistance and of Friction." USAEC Report No. AEC-TR-6630 (1966).
29. MILLER, D.S. "Internal flow. A guide to losses in pipe and duct systems." The British Hydromechanics Research Association, Cranfield, Bedford (1971).

30. Engineering Sciences Data Unit, 251-259 Regent Street, London, W1R 7AD. "Pressure losses in three leg pipe junctions: dividing flows." Report. 73022, (1973).
31. Engineering Sciences Data Unit. "Pressure losses in three leg pipe junctions: combining flows." (1973).

GRAFICAS A LAS QUE SE HACE REFERENCIA
EN EL PRESENTE DESARROLLO.

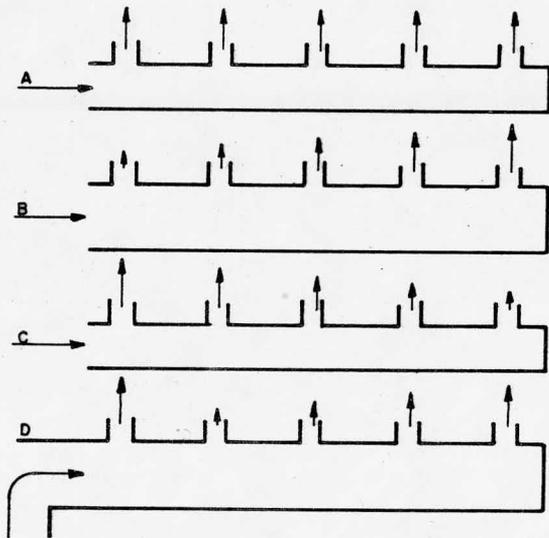


FIG. 1.—PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE CARGA

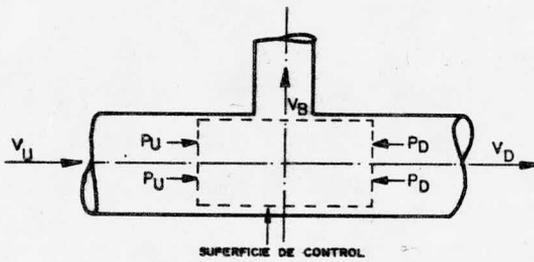


FIG. 2.—SUPERFICIE DE CONTROL PARA BALANCE DE MOMENTUM

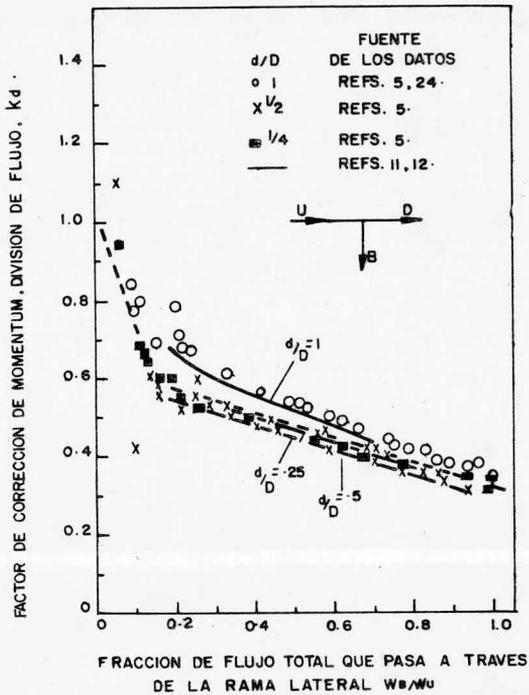


FIGURA 3.— FACTOR DE CORRECCION DE MOMENTUM. UNION T SIMPLE, DIVISION DE FLUJO EN UNA FASE.

(Segun St. Pierre y Giastombury(2) y completado por Mezey)

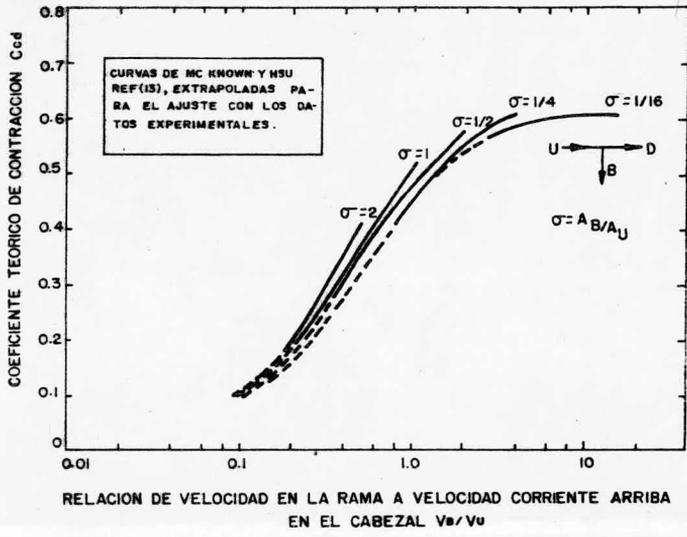


FIGURA 4.—COEFICIENTE TEORICO DE CONTRACCION, C_{cd} PARA DIVISION DE FLUJO EN UNA FASE (Según St. Pierre y Glastonbury (2))

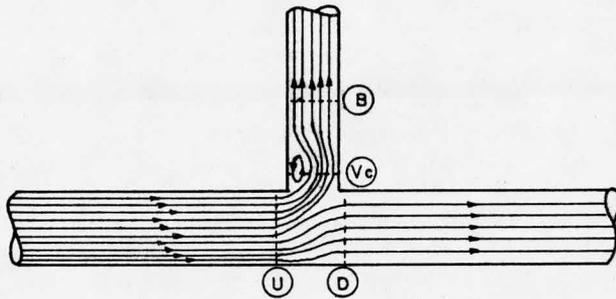


FIGURA 5(a). PATRON IDEAL DE LA DIVISION DE FLUJO A UNA RAMA

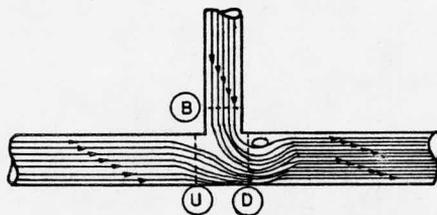
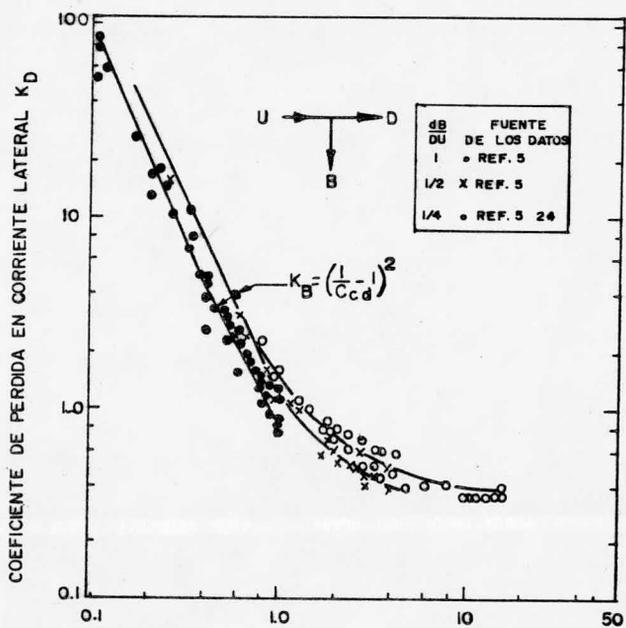


FIGURA 5(b). PATRON IDEAL DE LA COLECCION DE FLUJO DE UNA RAMA



RELACION DE VELOCIDAD EN LA RAMA A VELOCIDAD
CORRIENTE ARRIBA EN EL CABEZAL V_B/V_U

FIGURA 6.—COEFICIENTE DE PERDIDA EN CORRIENTE
LATERAL PARA DIVISION DE FLUJO EN UNA
FASE (Según St. Pierre y Glastonbury⁽²⁾)

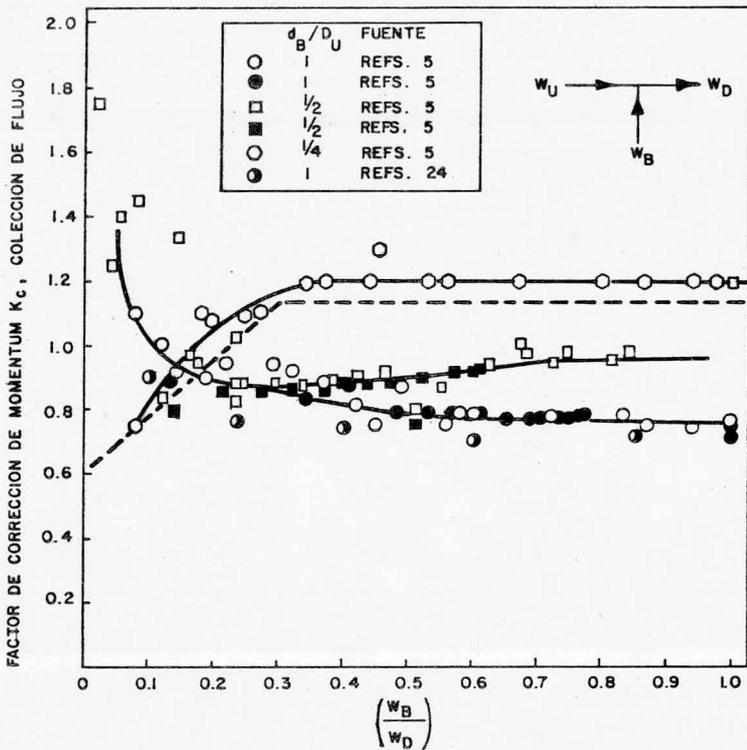


FIGURA 8. FACTOR DE CORRECCION DE-MOMENTUM, COLECCION DE FLUJO EN UNA UNION T SIMPLE Y UNA FASE (Segun St. Pierre y Gastonbury ⁽²⁾)



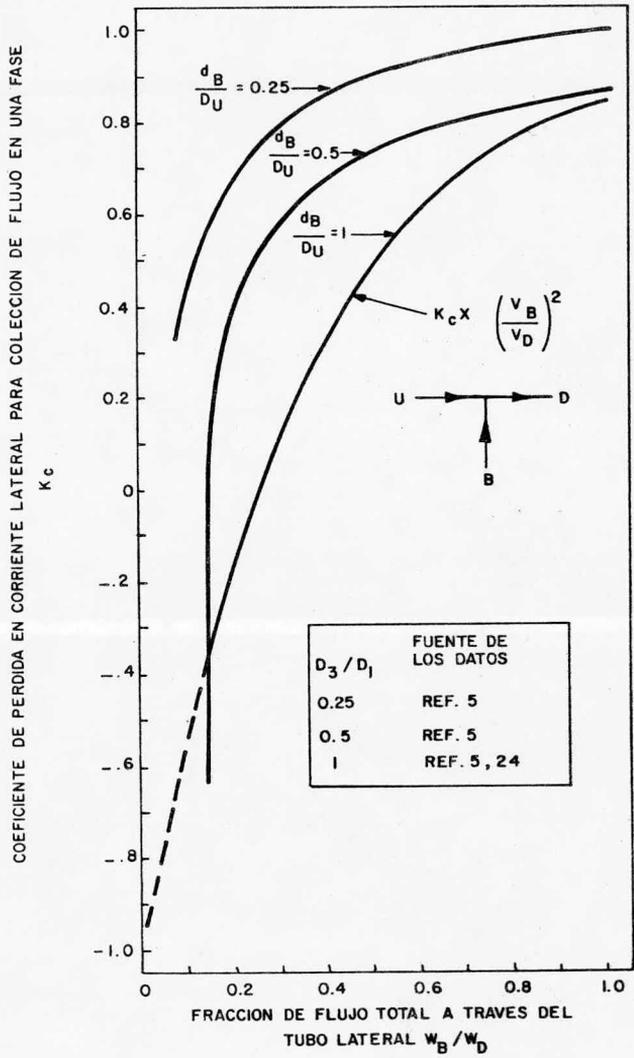


FIGURA 9- COEFICIENTE DE PERDIDA EN CORRIENTE LATERAL PARA COLECCION DE FLUJO EN UNA FASE (Segun St. Pierre y Glastonbury⁽²⁾)

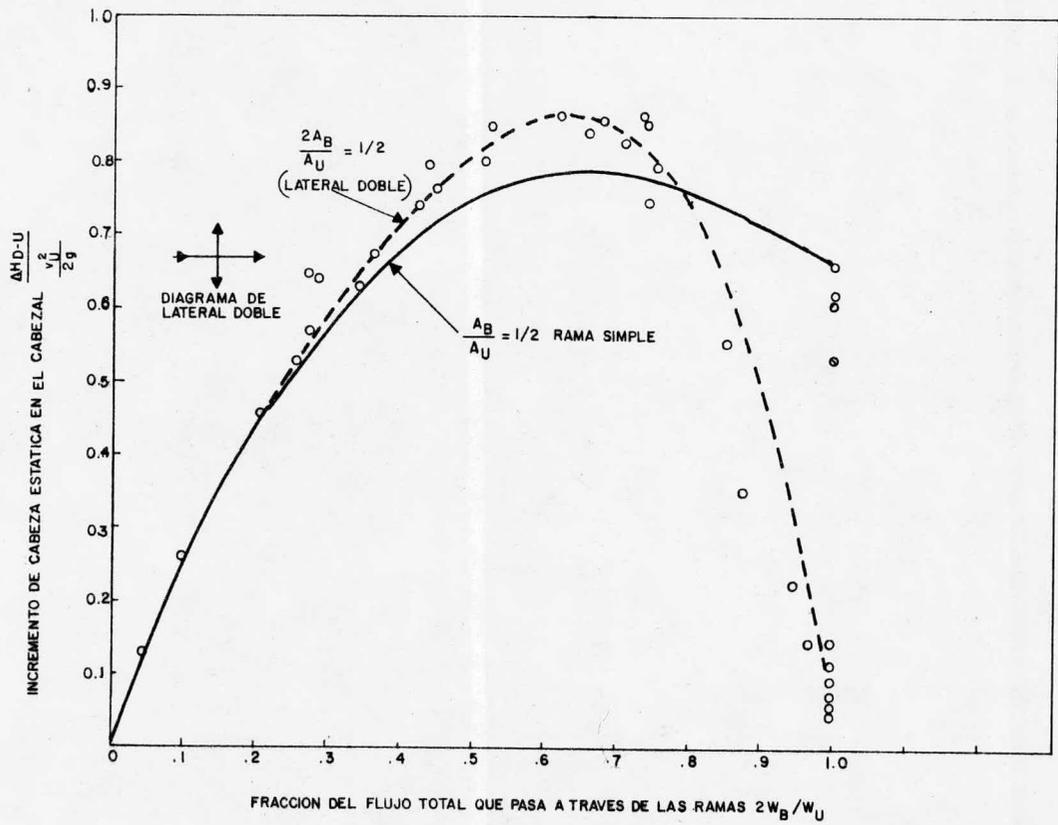


FIGURA 10-COMPARACION DE LATERALES DOBLE Y SENCILLA (REF.5)

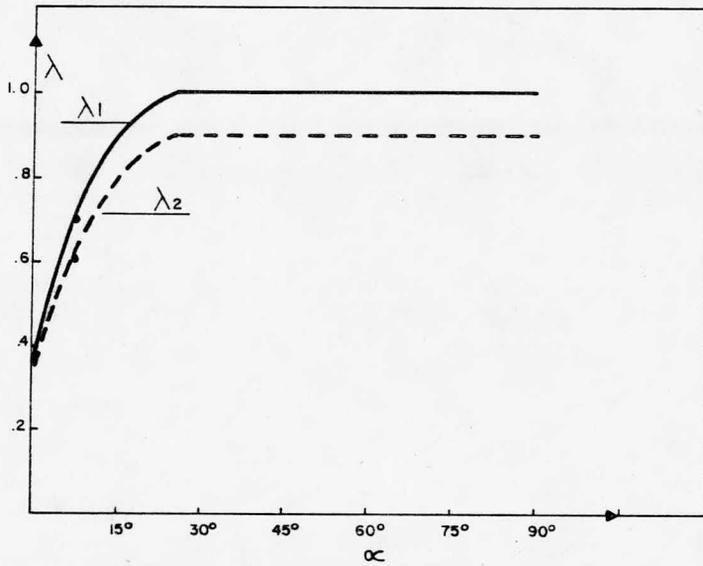


FIGURA 12- FACTORES DE CORRECCION PARA CAIDA DE PRESION EN RAMAS HORIZONTALES INCLINADAS CON DISTRIBUCION DE FLUJO (Segun Vazsonyi (4))

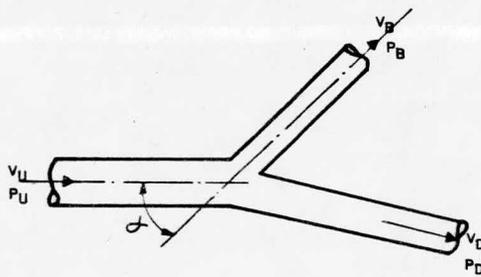


FIGURA 11-DIVISION DE FLUJO EN RAMAS INCLINADAS

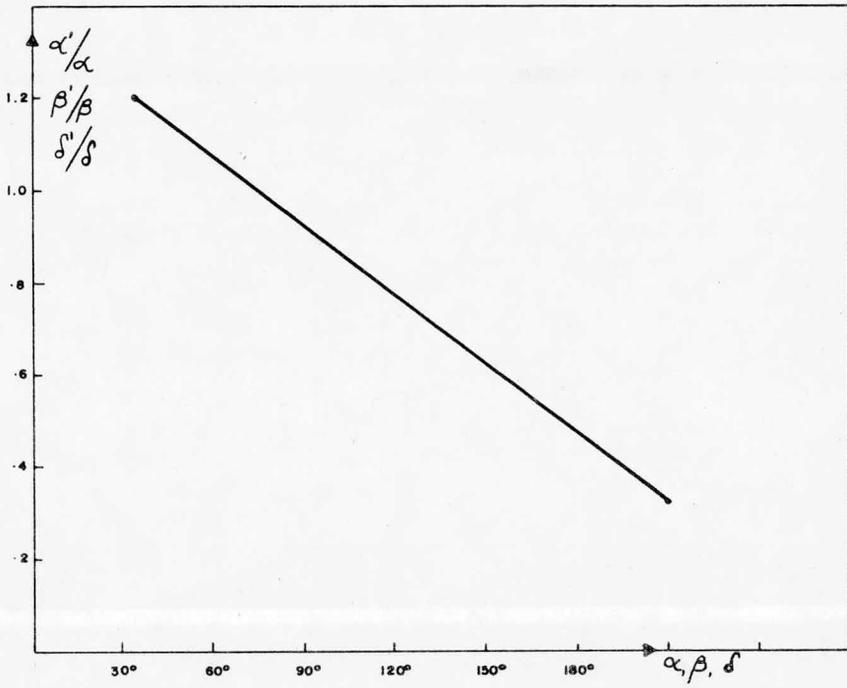


FIGURA 13.— ANGULO DE DEFLECCION EFECTIVO COMO UNA FUNCION DEL ANGULO DE DEFLECCION (Según Vazsonyi(4))

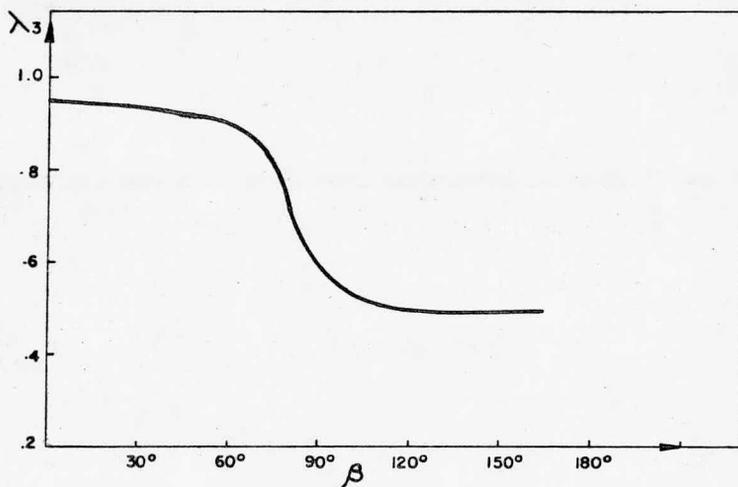


FIGURA 15 -- FACTOR DE CORRECCION PARA CAIDA DE PRESION EN RAMAS HORIZONTALES INCLINADAS CON COLECCION DE FLUJO (Según Vazsonyi (4))

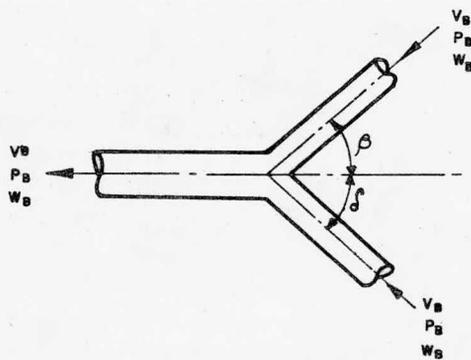


FIGURA 14 -- COLECCION DE FLUJO EN RAMAS INCLINADAS.

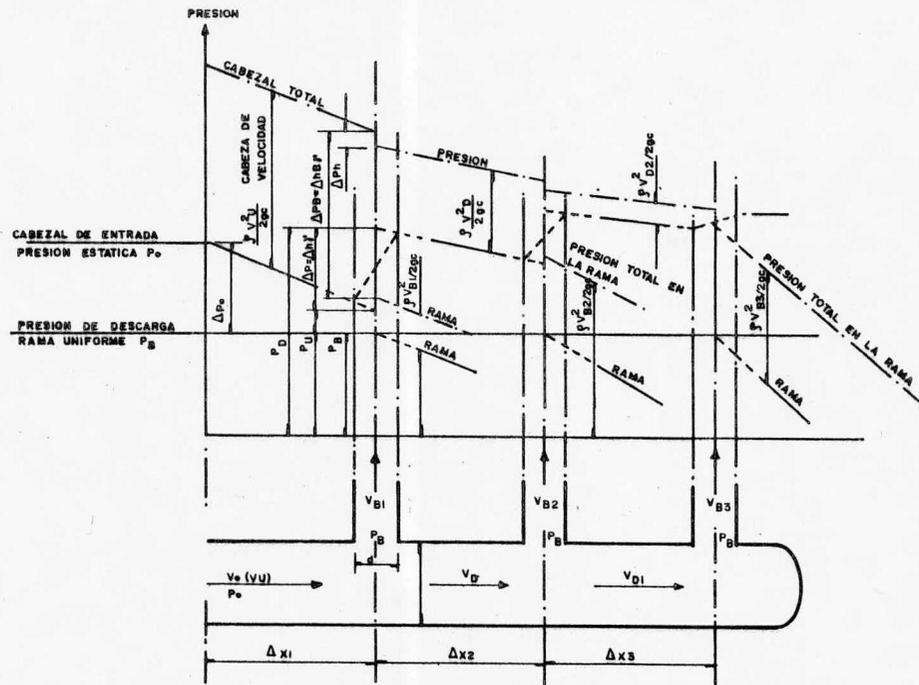


FIG. 16. _ RESULTADOS DE UN EXPERIMENTO TIPICO DE CABEZAL DE DISTRIBUCION

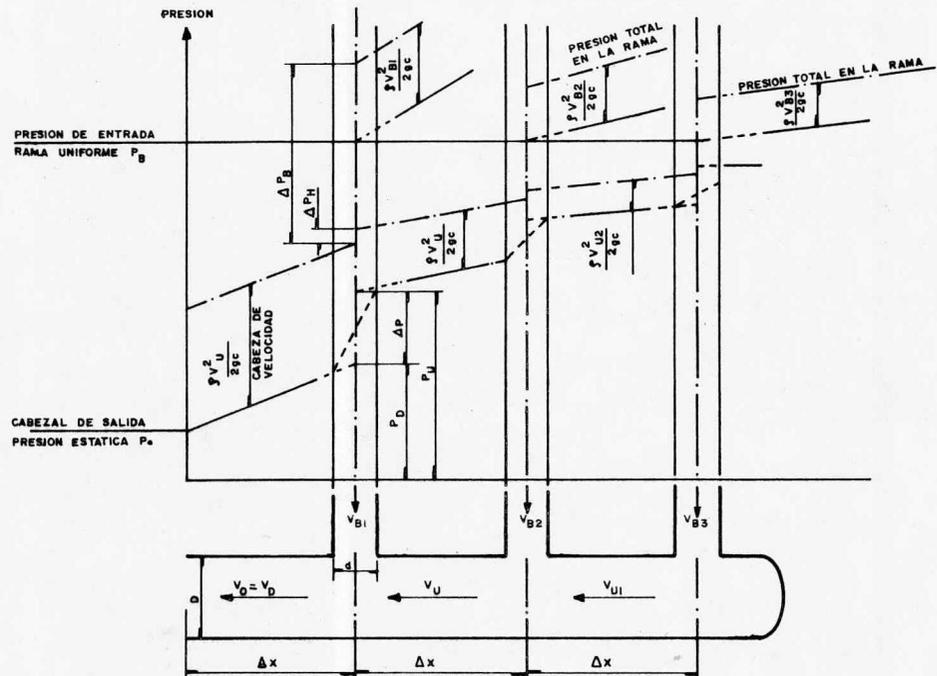


FIG. 17.- RESULTADOS DE UN EXPERIMENTO TIPO DE CABEZAL DE COLECCION

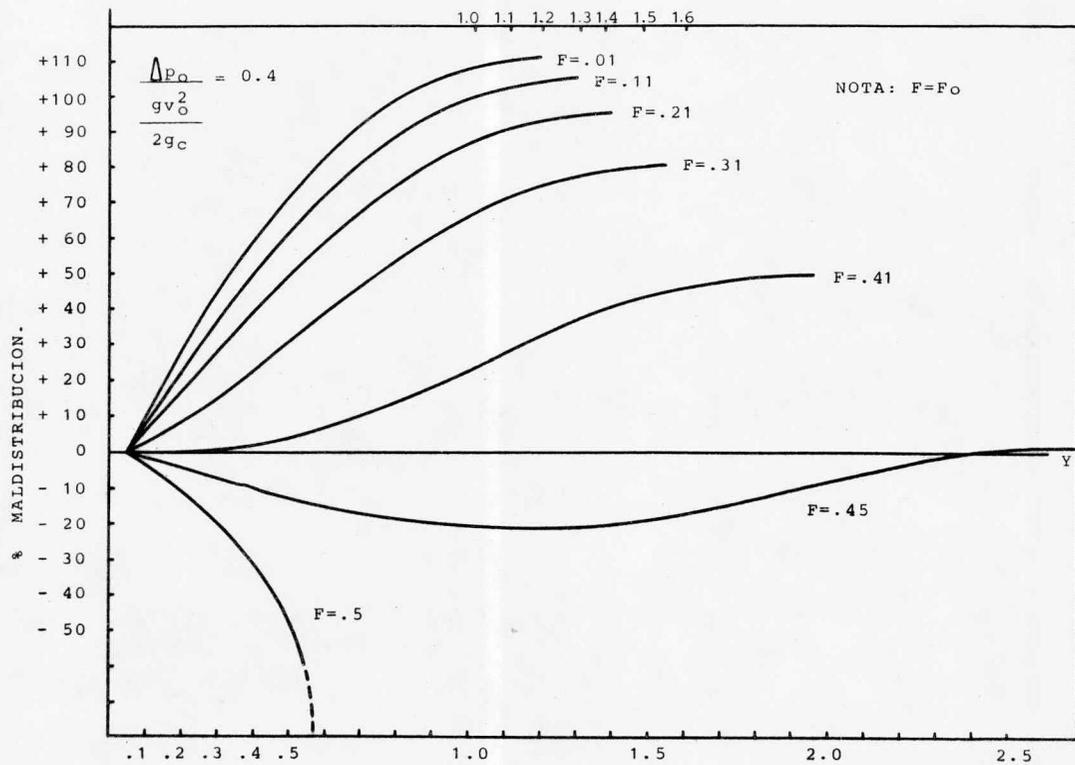


FIG. 18. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

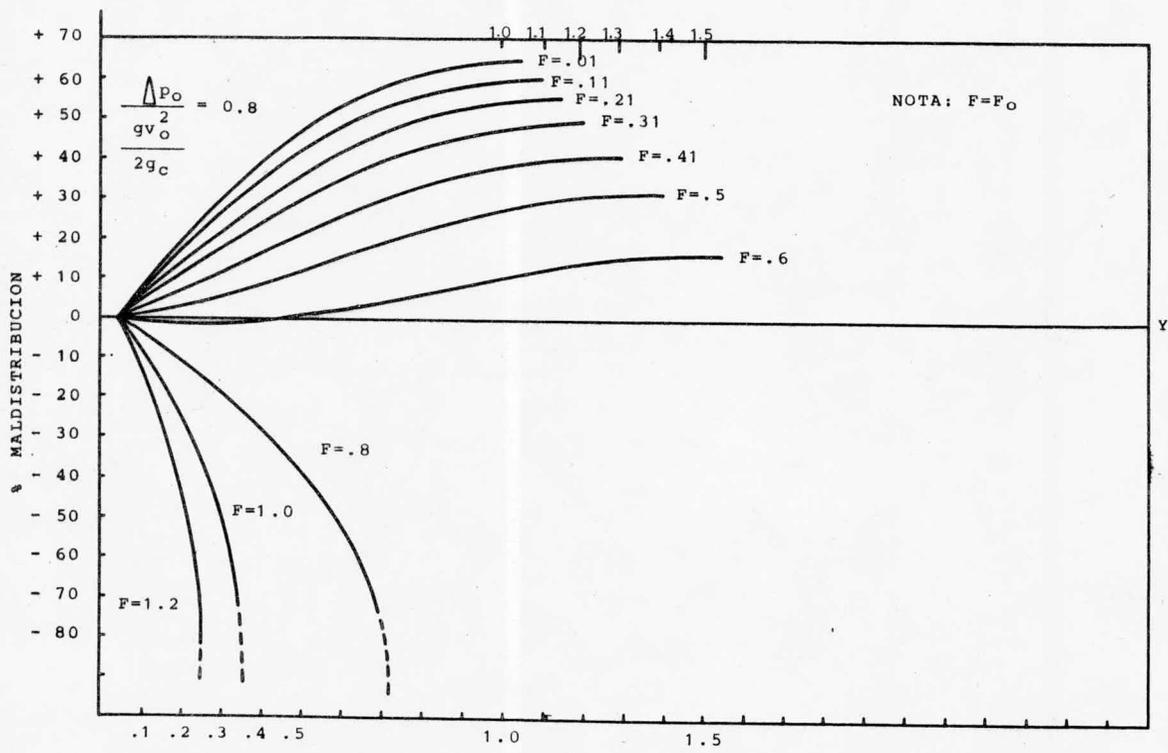


FIG. 19. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

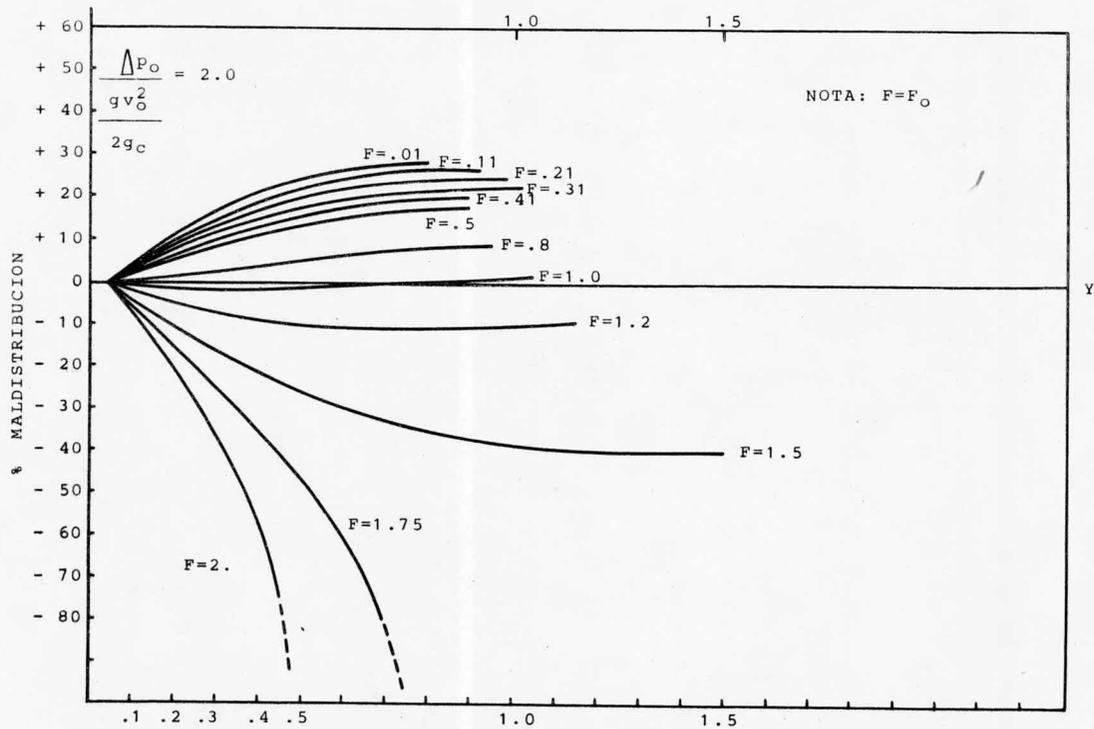


FIG. 20. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

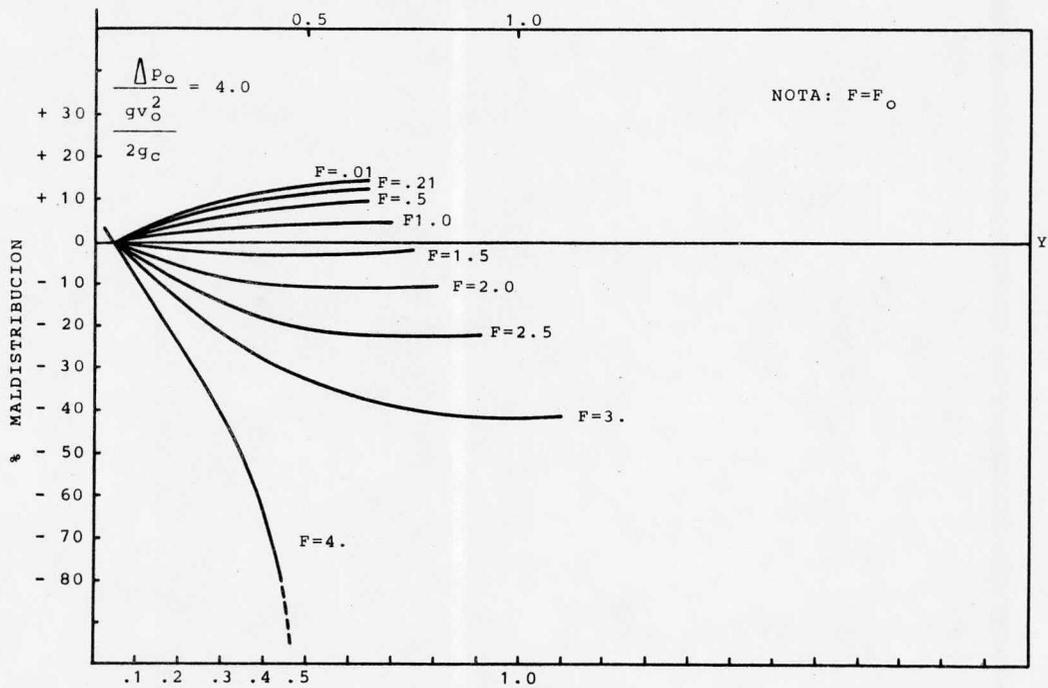


FIG. 21. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

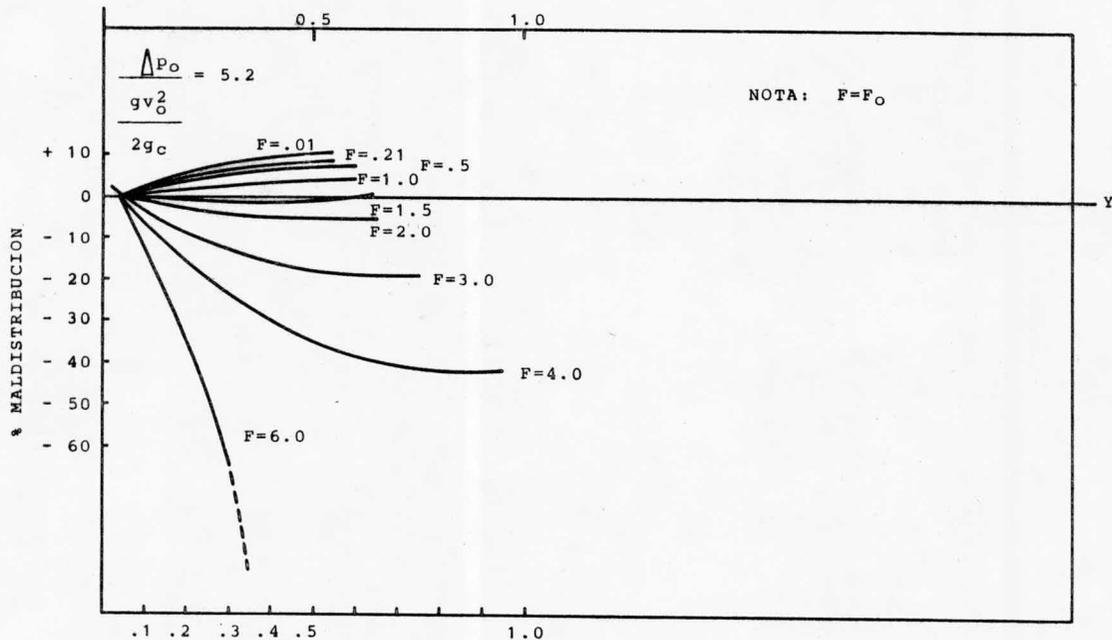


FIG. 22. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

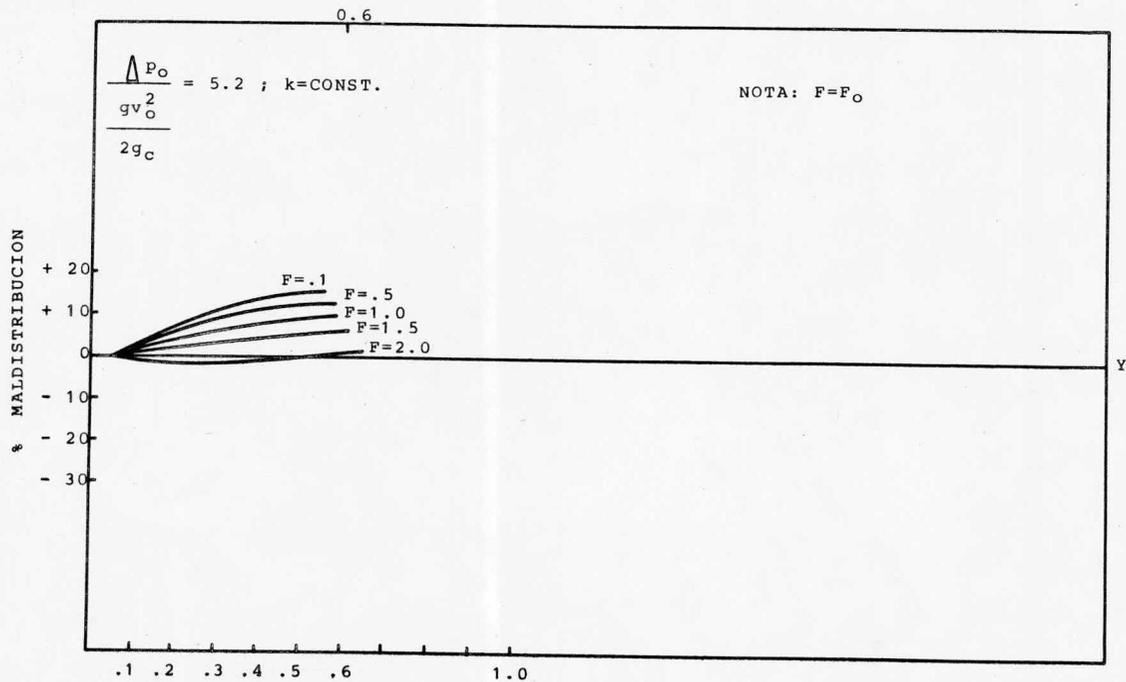


FIG. 23. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

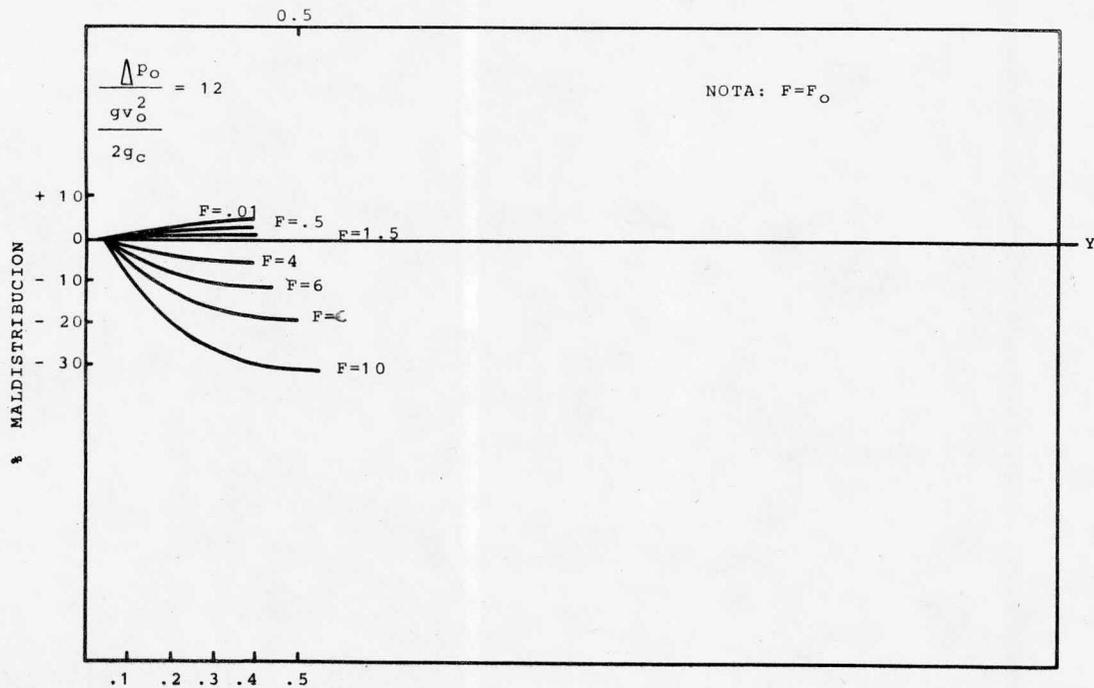


FIG. 24. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE DESCARGA.

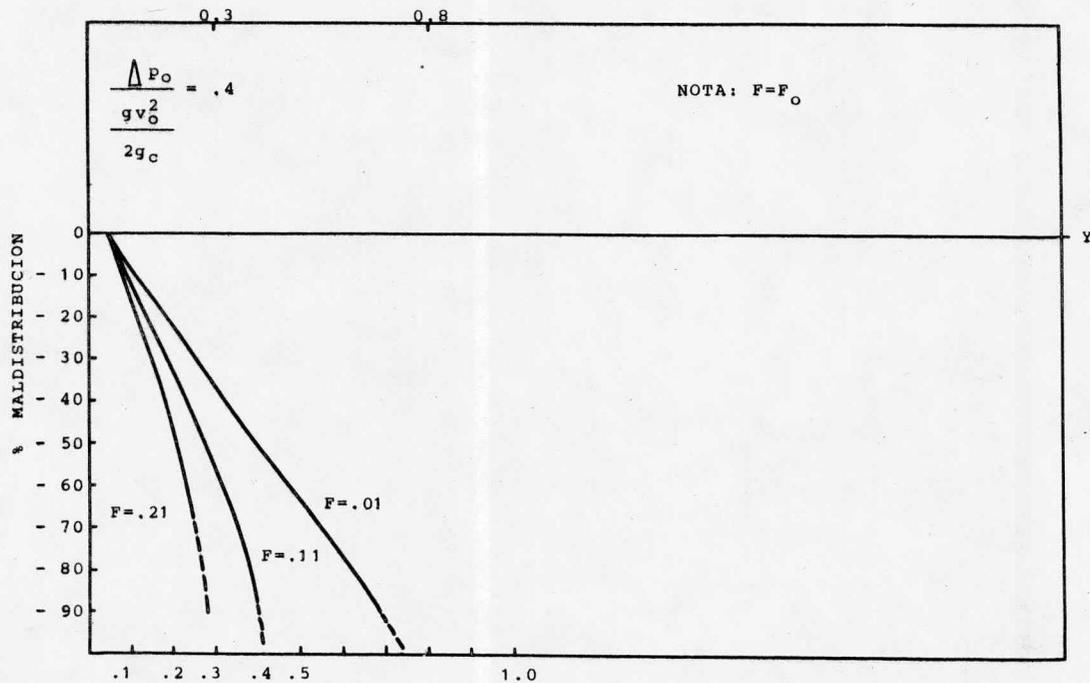


FIG. 25. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

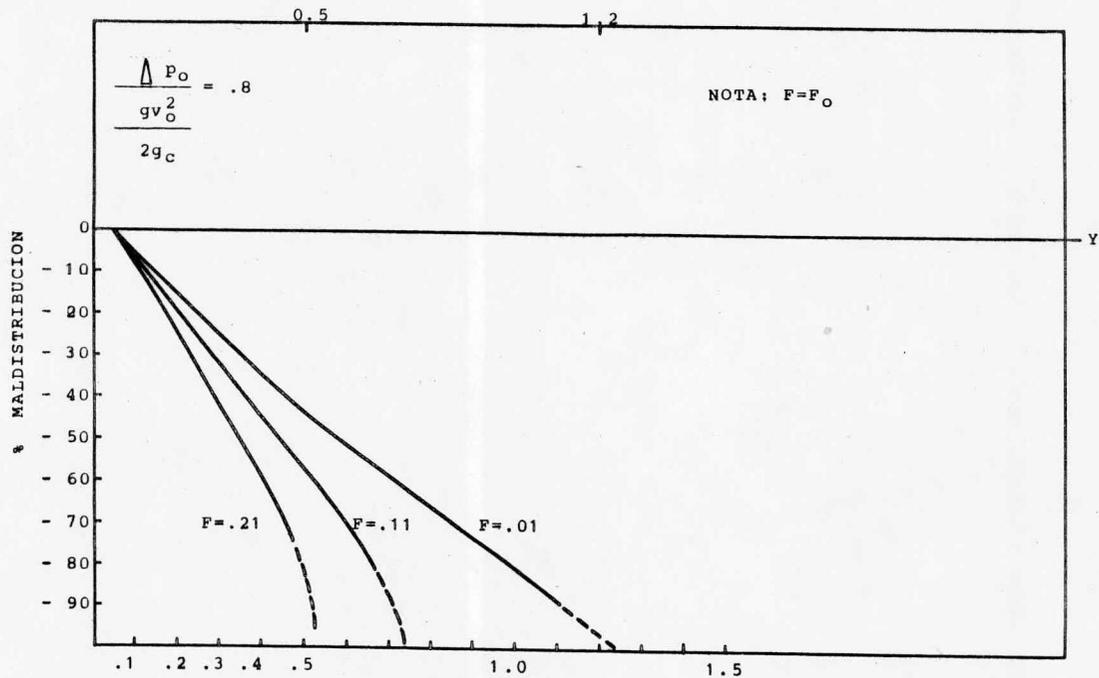


FIG. 26. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

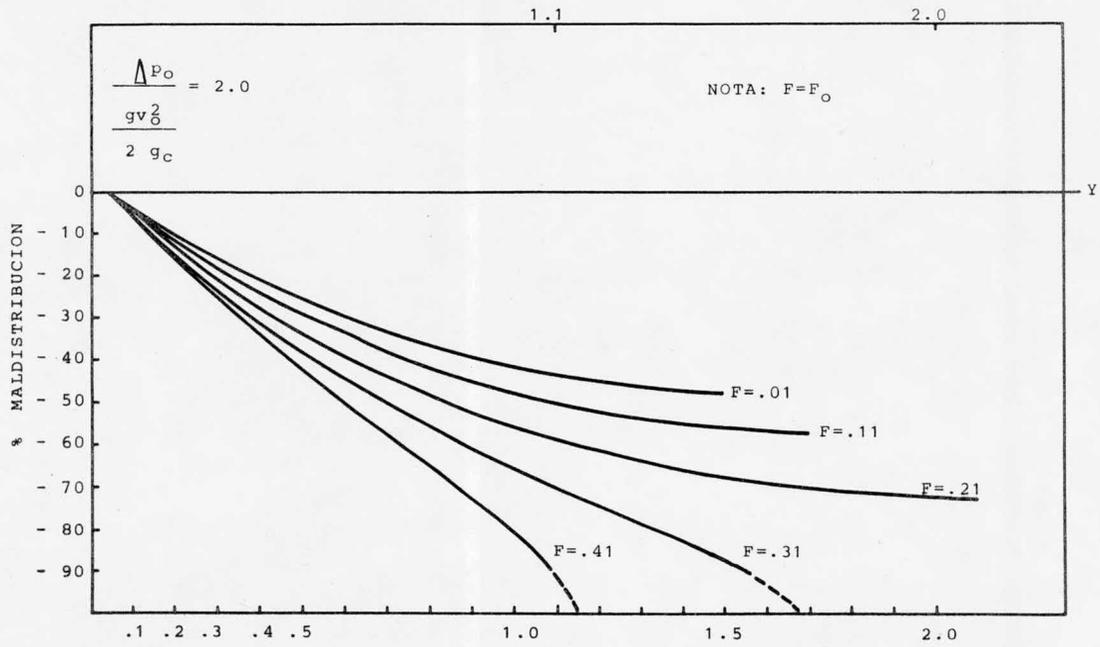


FIG. 27. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

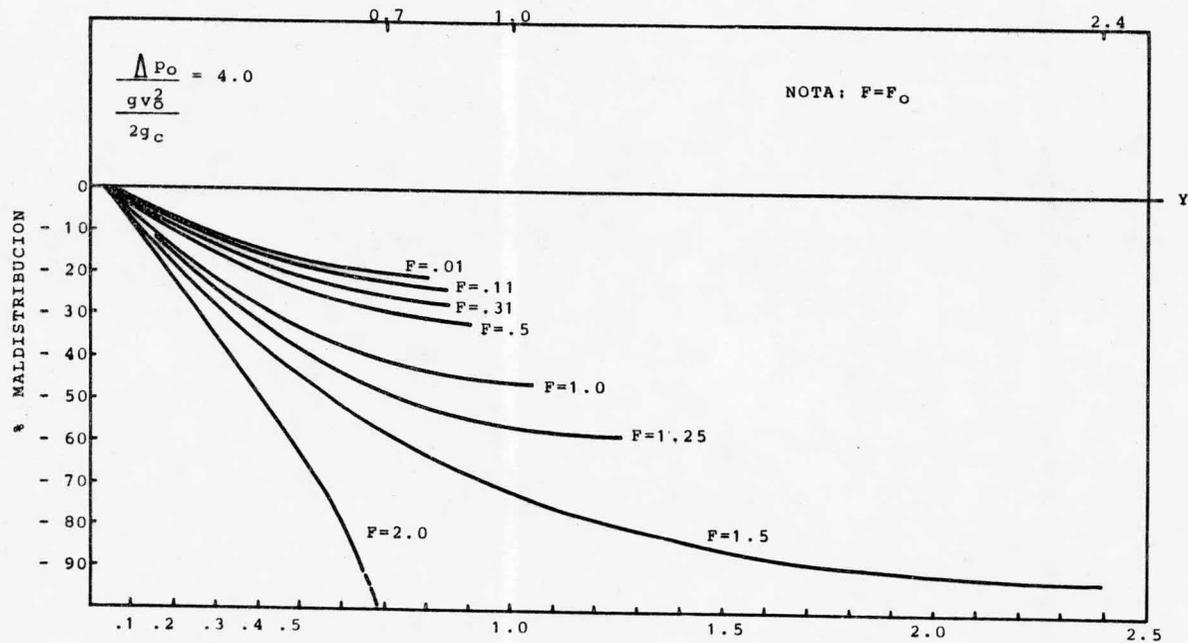


FIG. 28. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

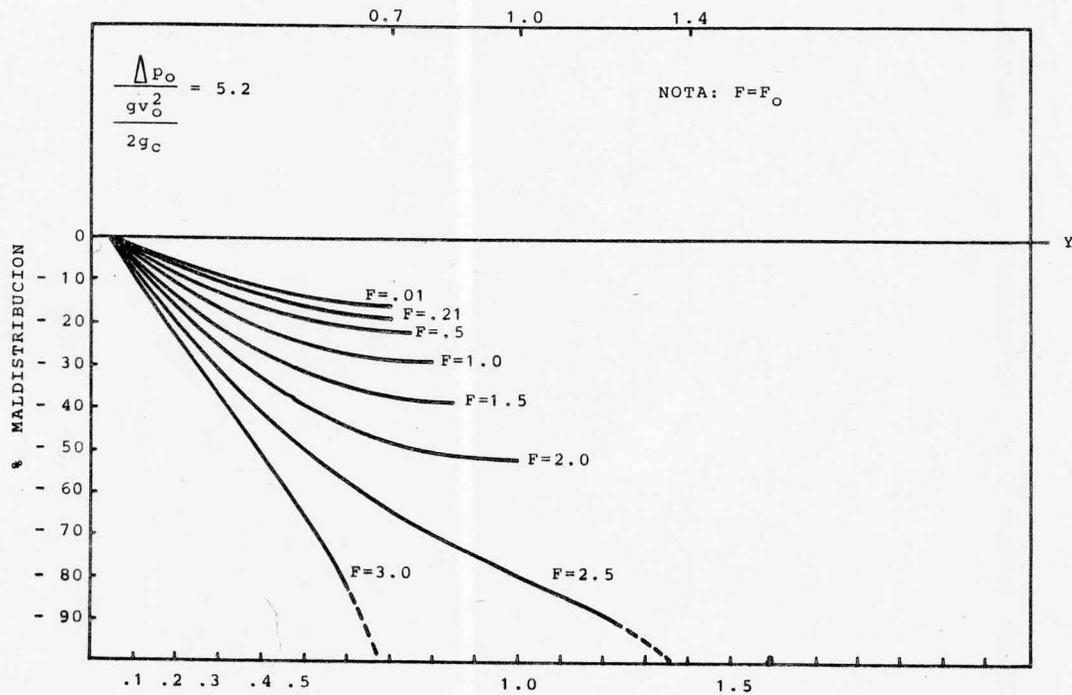


FIG. 29. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

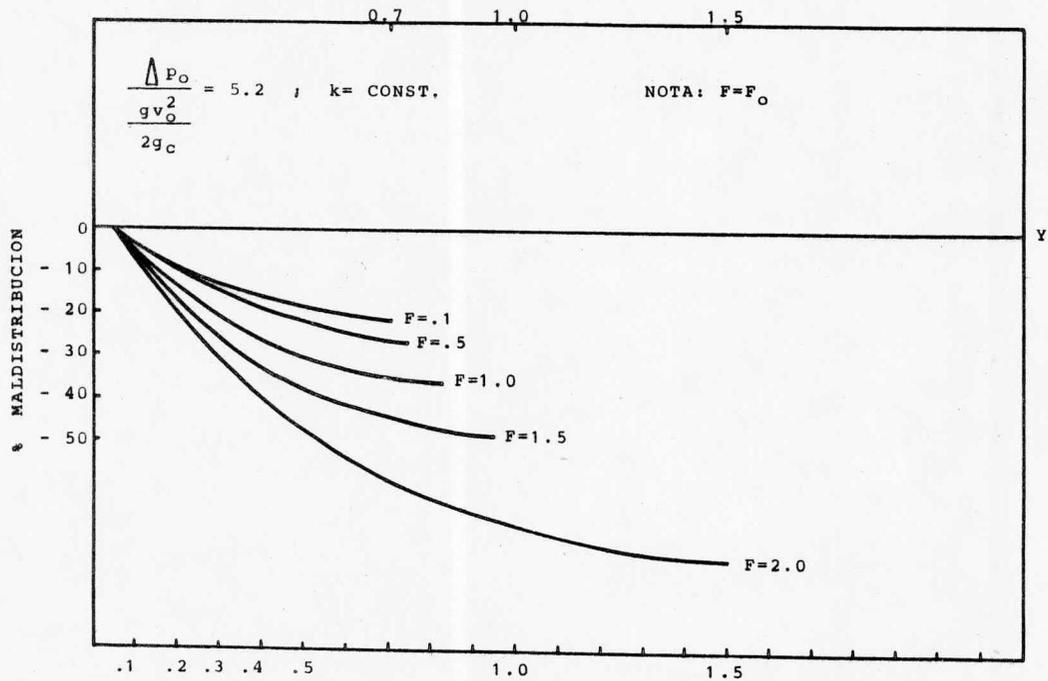


FIG. 30. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

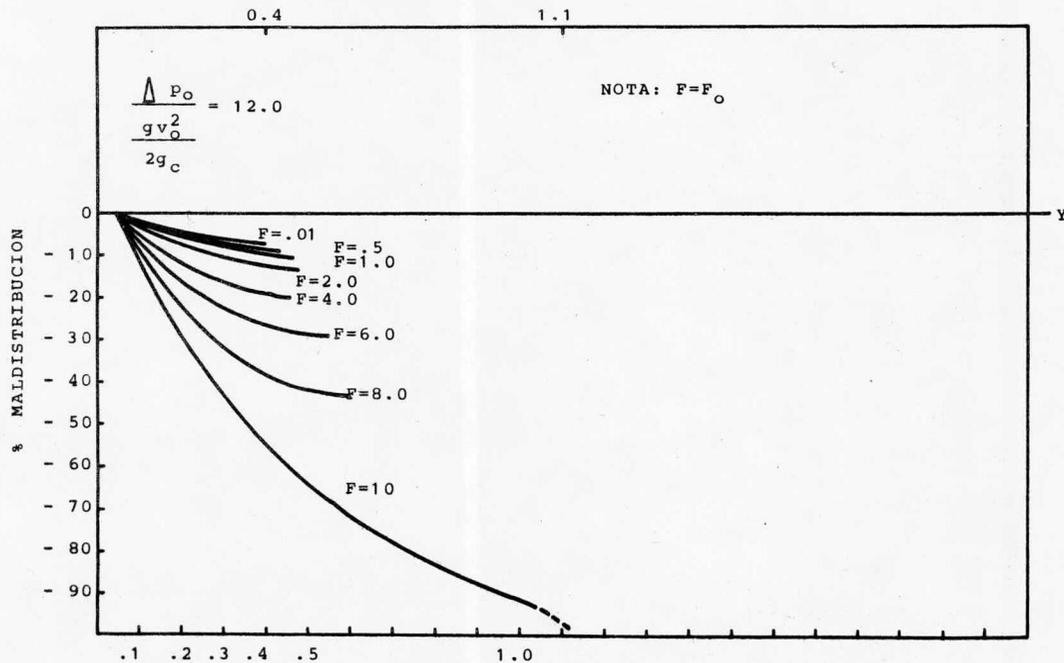


FIG. 31. PATRONES DE DISTRIBUCION DE FLUJO EN CABEZALES DE COLECCION.

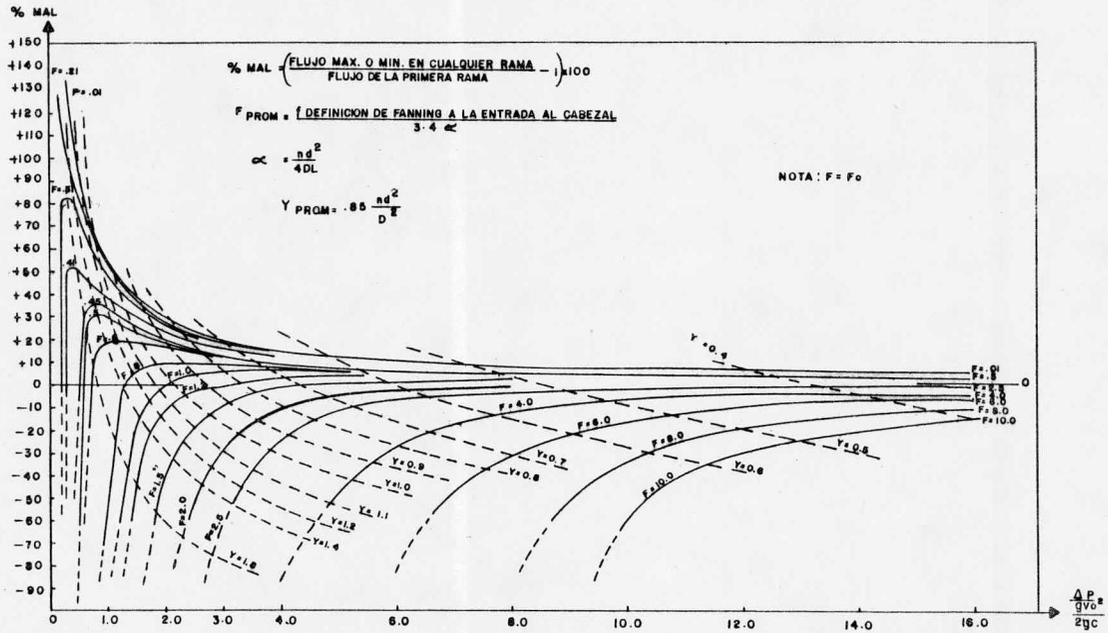


FIGURA 32. CABEZALES DE DISTRIBUCION: RELACION ENTRE GEOMETRIA, FACTOR DE FRICCION, DISTRIBUCION DE FLUJO Y PRESION

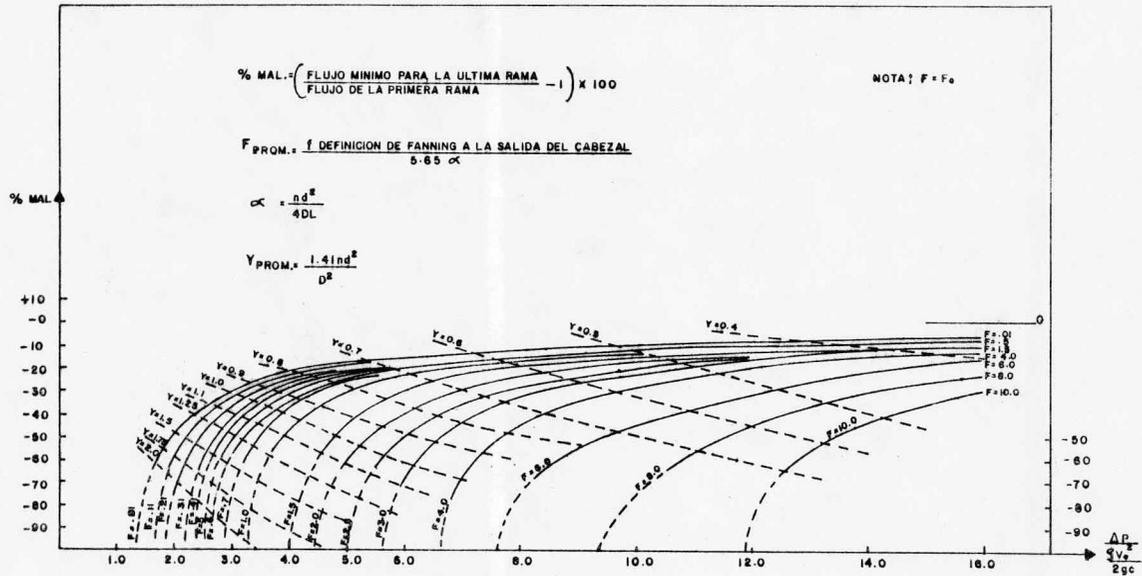


FIGURA 33. CABEZALES DE COLECCION: RELACION ENTRE GEOMETRIA, FACTOR DE FRICCION, DISTRIBUCION DE FLUJO Y PRESION.

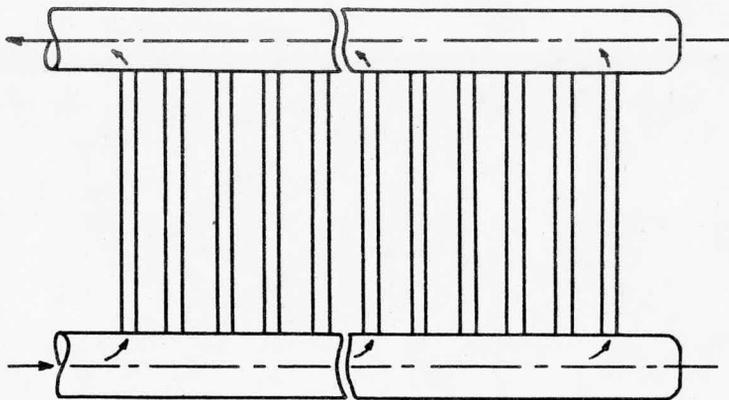


FIGURA A

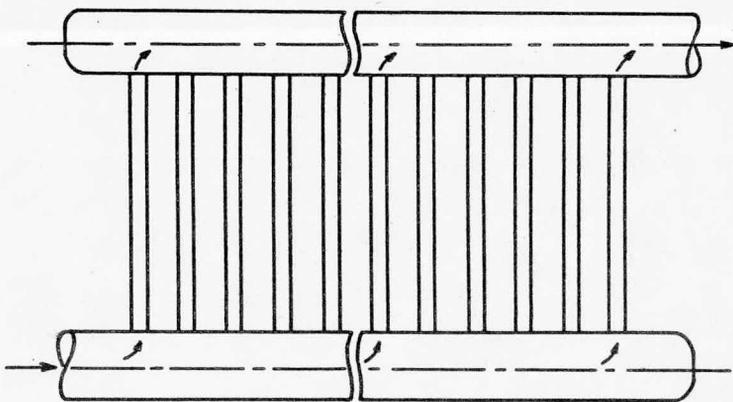


FIGURA B

PROGRAMA DE COMPUTADORA PARA LA SIMULACION
Y/O DISEÑO DE CABEZALES DE DISTRIBUCION
MULTIPLE EN SUPERCALIENTADORES.

```

C.....
C  PROGRAMA PRINCIPAL PARA LA SIMULACION Y/O DISENO DE CABEZALES
C  DE DISTRIBUCION MULTIPLE EN SUPERCALENTADORES.
C  OBJETIVO: 1) DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE DISENO.
C             2) OBTENCION DE LOS PERFILES DE: CAIDA DE PRESION,
C             DISTRIBUCION DE FLUJO, TEMPERATURA DEL FLUIDO DE
C             PROCESO, TEMPERATURA DE PARED Y COEFICIENTES IN-
C             DIVIDUAL Y GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.
C             TODO LO ANTERIOR POR TUBO Y POR ZONA DE FLUX
C             CONSTANTE.
C  FUNCION: EFECTUA LA LECTURA DE DATOS, IMPRESION DE RESULTADOS,
C           CONVERGENCIAS Y EL CONTROL DE LAS SUBROUTINAS USADAS
C           PARA EL ANALISIS.
C  VARIABLES PRINCIPALES:
C  IFL  INDICE DE TIPO DE FLUX
C       1: FLUX CONSTANTE    2: ZONIFICACION DE FLUXES
C  N    NUMERO DE ZONAS DE FLUX CONSTANTE EN TRAMO RECTO
C  ICA  INDICE DE TIPO DE REGIMEN DE FLUJO
C       1: ENTRADA Y SALIDA POR EL MISMO LADO
C       2: ENTRADA Y SALIDA POR LADOS OPUESTOS
C  IM   INDICE DE METODO DE CALCULO DE CAIDA DE PRESION
C       1: METODO RIGUROSO SIN FACTORES DE CORRECCION
C       2: METODO RIGUROSO CON FACTORES DE CORRECCION
C       3: METODO EMPIRICO CON FACTORES DE CORRECCION
C  NNT  NUMERO TOTAL DE TUBOS
C  LT   LONGITUD DEL TUBO (FT)
C  DMA  DIAMETRO INTERNO DEL CABEZAL (FT)
C  DMI  DIAMETRO INTERNO DEL TUBO (FT)
C  WVAT GASTO TOTAL DE FLUIDO (LB/HR)
C  PME  PRESION MEDIA DEL FLUIDO (LB/IN2)
C  TVA1 TEMPERATURA DE ENTRADA DEL FLUIDO (GF)
C  ATEX(J,3) ARREGLO DE FLUX, TEMPERATURA EXTERNA Y LONGITUD DE
C            LA ZONA DE FLUX CONSTANTE
C  WTC  GASTO EN EL TRAMO DE CABEZAL (LB/HR)
C  WTI  GASTO EN EL TUBO (LB/HR)
C  WP   GASTO PROMEDIO (LB/HR)
C  INTEGER T, AT
C  REAL LI
C  DIMENSION ITERA(10), APF(10), PD(100), WIG(100)
C  COMMON /KCI/ IM, TV1, IV0, AL, D, W, PME, U, TS, ITC, M, PDI, PDTR, PDS,
C 1PDCO, PUEX, PETEC, WTC, DMA, WTI, DMI, CK(8,4)
C  COMMON /KCC/ IFL, N, I, TVA1, IMH, T(10), ATEX(10,3)
C 1RDE, RDT, RW, AUG(10,100), AH10(10,100), ATW(10,100), ATVA(10,100)
C  COMMON /KCS/ AT(110), AWT(110), LL, FF, GG, OO, HH, AFWT(110), AS2DWT
C  LABELIST/IND/IFL, N, ICA, LL, IMH, IM, KAN
C  LABELIST/PROG/NNT, LT, DMA, DMI, WVAT, PME, TVA1, RDE, RDT, RW
111 FORMAT(8F10.6)
112 FORMAT(5F13.5)
110 FORMAT(3F13.5)
113 FORMAT(10I5)
114 FORMAT(10F5.3)
115 FORMAT(1H0,5X,'GASTO PROMEDIO DE FLUJO (WP)',3X,F6.2,3X,
1'LB/HR'//)
123 FORMAT(5X,4HJ= ,I3,5X,3HT= ,I3,20X,16HRE MENOR DE 2000//)
124 FORMAT(5X,'WTC=',E14.7,5X,'WTT=',E14.7,5X,'SWI=',E14.7,
15X,'XRE=',E14.7//)
1244 FORMAT(5X,'TIT=',E14.7,5X,'WWW=',E14.7,5X,'DDD=',E14.7,5X,
1' I =',I3//)
125 FORMAT(5X,' I',4X,'AFWT(I)',4X,'PD(I)',5X,'J',3X,'AUG(J,I)',
15X,'AH10(J,I)',3X,'ATW(J,I)',3X,'ATVA(J,I)'//)
126 FORMAT(5X,12,4X,F6.2,4X,F7.5,4X,I1,4X,F6.3,5X,F6.3,5X,F7.2,

```

```

15X,F7.2)
723 FORMAT(32X,I1,4X,F6.3,5X,F6.3,5X,F7.2,5X,F7.2)
138 FORMAT(5X,'ITC=2 EL FLUJO ESTA ENTRANDO Y SALIENDO POR EL
1 MISMO LADU')
139 FORMAT(5X,'I='I3,5X,'WTT='E14.7,5X,'SWI='E14.7,5X,
1'WTC='E14.7,5X,'SE ACABO EL FLUJO')
627 FORMAT(1H1,5X,'INDICE DE TIPO DE FLUX (IFL)',15X,I2)
628 FORMAT(1H0,5X,'NUMERO DE ZONAS POR TUBO (N)',15X,I2)
629 FORMAT(1H0,5X,'INDICE DE TIPO DE CABEZAL (ICA)',12X,I2)
630 FORMAT(1H0,5X,'NUMERO DE DATOS DE FLUJO PARA EL AJUSTE',/,
15X,' DE LA CURVA DE DISTRIBUCION (LL)',10X,I2)
631 FORMAT(1H0,5X,'INDICE DE METODO COEF.TRANSF.CALOR (IMH)',3X,I2)
632 FORMAT(1H0,5X,'INDICE DE METODO CAIDA DE PRESION (IM)',5X,I2)
633 FORMAT(1H0,5X,'INDICE DE GENERACION DE GRAFICAS (KAN)',5X,I2//)
634 FORMAT(1H0,5X,'NUMERO DE TUBOS (NTT)',17X,I2)
635 FORMAT(1H0,5X,'LONGITUD DEL TUBO (LT)',10X,F8.2,3X,'FT')
636 FORMAT(1H0,5X,'DIAM. INT. DEL TUBO (DMI)',7X,F8.4,3X,'FT')
637 FORMAT(1H0,5X,'DIA.INT. DEL CABEZAL (DMA)',6X,F8.4,3X,'FT')
638 FORMAT(1H0,5X,'GASTO TOTAL DE FLUJO (WVAT)',5X,F8.2,3X,'LB/HR')
639 FORMAT(1H0,5X,'TEMPERATURA DEL FLUIDO (TVA1)',3X,F8.2,3X,'GF')
640 FORMAT(1H0,5X,'PRESION DEL FLUIDO (PME)',8X,F8.2,3X,'LB/IN2'//)
641 FORMAT(1H0,5X,'ZONIFICACION DE FLUXES'//)
642 FORMAT(1H0,5X,'TEMP. (GF)',5X,'L. ZONA (FT)',5X,'FLUX (BTU/
1,'HRFT2)'//)
643 FORMAT(1H0,7X,F7.2,9X,F6.3,12X,F8.2//)
645 FORMAT(1H1,5X,'I',11X,'TUBO NO.')
646 FORMAT(1H0,5X,'J',11X,'ZONA DE FLUX CTE. NO.')
647 FORMAT(1H0,5X,'AFWT(1)',5X,'FLUJO EN EL TUBO I (LB/HR)')
648 FORMAT(1H0,5X,'PD(1)',7X,'CAIDA DE PRESTION TUBO I (LB/IN2)')
649 FORMAT(1H0,5X,'ATW(J,I)',4X,'TEMP. PARED DEL TUBO I ZONA J',
1' (GF)')
650 FORMAT(1H0,5X,'ATVA(J,I)',3X,'TEMP. FLUIDO DEL TUBO I ZONA J',
1' (GF)')
651 FORMAT(1H0,5X,'AHIO(J,I)',3X,'COEF. INDIV. TRANSF. CALOR',
1' TUBO I ZONA J (BTU/HRFT2GF)')
652 FORMAT(1H0,5X,'AUG(J,I)',4X,'COEF. GLOB. TRANSF. CALOR',
1' TUBO I ZONA J (BTU/HRFT2GF)'//)
NPROB=2
DO 99999 IPROB=1,NPROB
  READ(5,IND,END=999)
  READ(5,PRUG)
  READ(5,111)((CK(I,J),I=1,8),J=1,4)
  NOE=N+2
  GO TO (1112,1114),IFL
1112 READ(5,1110)((ATEX(I,J),I=1,NOE),J=1,3)
  GO TO 1115
1114 READ(5,1112)((ATEX(I,J),I=1,NOE),J=1,3)
1115 READ(5,1113)(AT(I),I=1,LL)
  READ(5,114)(APF(I),I=1,LL)
  WRITE(6,027)IFL
  WRITE(6,026)N
  WRITE(6,029)ICA
  WRITE(6,030)LL
  WRITE(6,031)IMH
  WRITE(6,032)IM
  WRITE(6,033)KAN
  WRITE(6,034)NTT
  WRITE(6,035)LT
  WRITE(6,036)DMI
  WRITE(6,037)DMA
  WRITE(6,038)WVAT

```

```

WRITE(0,039)TVA1
WRITE(0,040)PME
WRITE(0,041)
WRITE(0,042)
WRITE(0,043)((ATEX(I,J),J=1,3),I=1,NOE)
IF(ICA.GI.1) GO TO 1000
ANIT=NT
WP=WVAI/ANIT
DO 2 I=1,LL
WX=WP*APF(1)
AWI(1)=WA
2 CONTINUE
10 CALL REGCO
WRITE(0,110)WP
SVI=0.
SDS=0.
IS=0
SWI=0.
SPUI=0.
SPUS=0.
J=1
DO 500 I=1,96
AFWT(I)=FF+GG*I+HH*I**2+OO*I**3
IF(I.GI.1) GO TO 333
AT(I)=1
GO TO 16
333 AT(LL+I-1)=I
10 IF(J.GI.1) GO TO 3
WIC(1)=AFWT(1)
3 IF(I.GI.1) GO TO 4
WTC=WVAT
WTI=AFWT(1)
GO TO 3
4 WTI=AFWT(1)
IF(J.GI.1) GO TO 777
SWI=SWI+AFWT(I-1)
WTC=WVAT-SWI
IF(WIC)87,07,88
07 WRITE(0,139)I,WTI,SWI,WTC
GO TO 99999
88 GO TO 3
777 SWI=SWI
WTC=WVAT-SWI
IF(WTC)89,09,95
89 WRITE(0,139)I,WTI,SWI,WTC
GO TO 99999
5 CALL CUTVW(ITERA,WTC,DMA,WTT,DMI,PME,JJ,XRE,TTT,WWW,DDD)
JJJ=1(JJ)
GO TO(31,33),JJJ
31 WRITE(0,123)JJ,JJJ
WRITE(0,124)WTC,WTI,SWI,XRE
WRITE(0,124)TTT,WWW,DDD,I
GO TO 99999
33 ITC=1
M=1
IF(I.GI.1) GO TO 6
TVI=TVA1
GO TO 7
6 TVI=ATVA(M,I-1)
7 IVU=ATVA(M,I)
TS=ATEX(M,1)

```

```

AL=ATEX(M,2)
U=AUG(M,1)
W=WTC
U=UMA
CALL CAPRE
SPUI=PU1
M=M+2
TV1=ATVA(M-1,I)
TV0=ATVA(M,I)
TS=ATEX(M,1)
AL=ATEX(M,2)
U=AUG(M,1)
CALL CAPKE
SPUS=PUS
GO TO (10,20),IFL
10 ITC=5
M=2
TV1=ATVA(M-1,I)
TV0=ATVA(M,I)
TS=ATEX(M,1)
W=WTF
U=UMI
AL=LT
U=AUG(M,1)
CALL CAPRL
PDT=PETEC
12 PD(I)=SPUI+SPDS+PDT
GO TO 13
20 IT=N+1
PDT=0.
DO 15 M=2,IT
TV1=ATVA(M-1,I)
TV0=ATVA(M,I)
TS=ATEX(M,1)
AL=ATEX(M,2)
W=WTF
U=UMI
U=AUG(M,1)
IF(M.LE.2) GO TO 8
IF(M.GT.2.AND.M.LT.IT) GO TO 9
ITC=4
GO TO 11
8 ITC=2
GO TO 11
9 ITC=3
11 CALL CAPRE
PDT=PDT+PETEC
GO TO 12
15 CONTINUE
13 IF(I.LT.2) GO TO 222
GO TO 888
222 AWT(I)=AFWT(I)*1.1
SVP=SVP+WIG(I)**2
SDS=SDS+(AFWT(I)-WIG(I))**2
J=1
GO TO 500
888 CONV=ABS(PD(I)-PD(1))
IF(CONV.LE.1.500000) GO TO 14
J=J+1
AY=ABS((AFWT(I)-AFWT(I-1))/2.)
IF(PD(I)-PD(1)) 30,30,40

```

```

30 AFWT(I)=AFWT(I)+AY
   GO TO 660
40 AFWT(I)=AFWT(I)-AY
660 AWT(LL+I-1)=AFWT(I)
   IF(J.GT.20) GO TO 17
   GO TO 16
14 AWT(LL+I-1)=AFWT(I)
   IF(I.GE.0) GO TO 17
   SVP=SVP+WTG(I)**2
   SDS=SDS+(AFWT(I)-WTG(I))**2
   J=1
   GO TO 500
17 SVP=SVP+WTG(I)**2
   SDS=SDS+(AFWT(I)-WTG(I))**2
   J=1
   IF(IS.GE.3) GO TO 600
   VP=(SVP/I)**0.5
   US=(SDS/I)**0.5
   VAV=US
   IF(AAA.LL.1000.000) GO TO 500
   LL=LL+1-1
   IS=IS+1
   GO TO 18
500 CONTINUE
600 WRITE(6,045)
   WRITE(6,046)
   WRITE(6,047)
   WRITE(6,048)
   WRITE(6,049)
   WRITE(6,050)
   WRITE(6,051)
   WRITE(6,052)
   WRITE(6,125)
   NNV=N+2
   INN=I-1
   DO 720 KK=1,INN
   DO 721 K=1,NNN
   IF(K.EQ.1) GO TO 722
   WRITE(6,723)K,AUG(K,KK),AHIO(K,KK),ATW(K,KK),ATVA(K,KK)
   GO TO 721
722 WRITE(6,120)KK,AFWT(KK),PD(KK),K,AUG(K,KK),AHIO(K,KK),ATW(K,KK)
   1),ATVA(K,KK)
721 CONTINUE
720 CONTINUE
   NUT=NUT-2
   GO TO (238,239),KAN
239 CALL PLOIS(0,0,2)
   CALL AVISO('IFN')
   CALL FACTOR(0.00)
   CALL PERFL(AUG,AHIO,ATW,ATVA,AFWT,NUT,IFL)
   CALL FINAL
238 GO TO 99999
1000 WRITE(6,130)
99999 CONTINUE
999 STOP
   END
C::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

```

COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

```

C.....:
C SUBROUTINA DE REGRESION POLINOMIAL (METODO DE MINIMOS CUADRA-
C DOS). EFECTUA LA REGRESION DE LOS DATOS DE GASTO DE FLUIDO
C POR TUBO, GENERANDO UN MEJOR ESTIMADO Y AL FINAL LA CURVA DE
C DISTRIBUCION DE FLUJO EN EL CABEZAL DE ACUERDO A LOS CRITE-
C RIOS DE CONVERGENCIA PRESENTES.
SUBROUTINE REGCOU
INTEGER I
COMMON /RCS/ T(110),WT(110),N,F,G,O,H,FWT(110),S2DWT
AMEN
ST=0.
ST2=0.
ST3=0.
ST4=0.
ST5=0.
ST6=0.
SWT=0.
STWT=0.
ST2WT=0.
ST3WT=0.
ST4WT=0.
DO 5 I=1,N
ST=ST+T(I)
ST2=ST2+T(I)**2
ST3=ST3+T(I)**3
ST4=ST4+T(I)**4
ST5=ST5+T(I)**5
ST6=ST6+T(I)**6
SWT=SWT+WT(I)
STWT=STWT+T(I)*WT(I)
ST2WT=ST2WT+T(I)**2*WT(I)
ST3WT=ST3WT+T(I)**3*WT(I)
UNO=ST*(ST4*ST6-ST5**2)-ST3*(ST3*ST6-ST4*ST5)+ST4*(ST3*ST5-ST4**2)
1)
DET1=AN*UNO
O3=ST*(ST4*ST6-ST5**2)-ST3*(ST2*ST6-ST3*ST5)+ST4*(ST2*ST5-ST3*ST4)
1)
DET2=S1*O3
DET3=ST2*(ST*(ST3*ST6-ST4*ST5)-ST2*(ST2*ST6-ST3*ST5)+ST4*(ST2*ST4-
ST3**2))
DET4=S13*(ST*(ST3*ST5-ST4**2)-ST2*(ST2*ST5-ST3*ST4)+ST3*(ST2*ST4-S
T3**2))
DET=DET1-DET2+DET3-DET4
F1=SWT*UNO
F2=ST*(STWT*(ST4*ST6-ST5**2)-ST3*(ST2WT*ST6-ST3WT*ST5)+ST4*(ST2WT*
ST5-ST3WT*ST4))
F3=ST2*(STWT*(ST3*ST6-ST4*ST5)-ST2*(ST2WT*ST6-ST3WT*ST5)+ST4*(ST2W
T*ST4-ST3WT*ST3))
F4=ST3*(STWT*(ST3*ST5-ST4**2)-ST2*(ST2WT*ST5-ST3WT*ST4)+ST3*(ST2W
T*ST4-ST3WT*ST3))
F=(F1-F2+F3-F4)/DET
G1=AN*(STWT*(ST4*ST6-ST5**2)-ST3*(ST2WT*ST6-ST3WT*ST5)+ST4*(ST2WT*
ST5-ST3WT*ST4))
G2=SWT*O3
G3=ST2*(ST*(ST2WT*ST6-ST3WT*ST5)-STWT*(ST2*ST6-ST3*ST5)+ST4*(ST2*S
T3WT-ST3*ST2WT))
G4=ST3*(ST*(ST2WT*ST5-ST3WT*ST4)-STWT*(ST2*ST5-ST3*ST4)+ST3*(ST2*S
T3WT-ST3*ST2WT))
G=(G1-G2+G3-G4)/DET
O=(ST3*(SWT-F*AN-G*ST)-ST2*(STWT-F*ST-G*ST2))/(ST3**2-ST4*ST2)
H=(SWT-F*AN-G*ST-O*ST3)/ST2

```

```
FWT(I)=F+G*T(I)+H*T(I)**2+O*T(I)**3
S2DWT=S2DWT+(FWT(I)-WT(I))**2
S CONTINUE
RETURN
END
```

C::

COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

```

C ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
C  SUBROUTINA PARA LA DETERMINACION DE COEFICIENTES DE TRANSFEREN-
C  CIA DE CALOR, TEMPERATURAS DEL FLUIDO DE PROCESO Y TEMPERATU-
C  RAS DE PARED.
C  VARIABLES PRINCIPALES:
C  TVI  TEMPERATURA DEL FLUIDO AL INICIO DEL INTERVALO (GF)
C  TVO  TEMPERATURA DEL FLUIDO AL FINAL DEL INTERVALO (GF)
C  AL   LONGITUD DEL INTERVALO (FT)
C  TS   TEMPERATURA EXTERNA EN EL INTERVALO (GF)
C  U    COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSF. DE CALOR (BTU/HRFT2GF)
C  RDE  RESISTENCIAS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR INCRUS-
C  TION.
C  RW
C  SUBROUTINE COTVT*(CONT,BWTC,BDMA,BWTT,BDMI,BPME,J,BRE,T,W,D)
C  INTEGER COU,TEST
C  REAL JHT
C  DIMENSION CONT(10)
C  COMMON /RC2/ NIFL,NN,NI,BTVA1,NIMH,TEST(
10),BATX(10,3),BRGE,BROT,BRW,BAUG(10,100),BAHIO(10,100),BATW(10,
2100),BATVA(10,100)
C  COMMON /RC21/ BCT,BPR
C  IF(NIFL.LE.1) GO TO 1
C  L2=NN+2
C  GO TO 2
1  L2=3
2  DO 100 J=1,L2
C  IF(NI.LE.1.AND.J.LE.1) GO TO 3
C  IF(NI.LE.1.AND.J.GT.1.AND.J.GE.L2) GO TO 4
C  IF(NI.LE.1.AND.J.GT.1.AND.J.LT.L2) GO TO 5
C  IF(J.GT.1.AND.J.GE.L2) GO TO 6
C  IF(J.GT.1.AND.J.LT.L2) GO TO 5
C  T=BATVA(J,NI-1)
C  GO TO 7
3  T=BTVA1
C  W=BWTC
C  D=BDMA
C  GO TO 9
4  W=BWTC
C  D=BDMA
C  GO TO 6
5  W=BWTT
C  D=BDMI
6  T=BATVA(J-1,NI)
C  GO TO 9
6  TTU=BATVA(J-1,NI-1)
C  TCA=BATVA(J,NI-1)
C  TTU1=BATVA(J-1,NI)
C  TRES=T(TU1+BWTC*(TCA-TTU))/(BWTC+PWTT)
C  T=TRES
7  W=BWTC
C  D=BDMA
9  BTVI=T
C  BTVO=BTVI
C  CALL PROPIE(W,D,BTVI,BPME,BTVO,BCP,BVISS,BRE)
30 GO TO(10,20,20),NIMH
20 CONTINUE
10 IF(BRE.GE.2000..AND.BRE.LE.8000.) GO TO 11
C  IF(BRE.GE.2000..AND.BRE.GT.8000.) GO TO 12
C  TEST(J)=1
C  GO TO 355
11 X=SAIEX(J,2)/D

```

```

*      Q=(ALOG(BRE)-7.65)/2.66
*      B=7.04/(5.52+ALOG(X))
*      Y=Q*B
*      JHT=EXP(0.33*ALOG(X)*(Y-1.)+(1.42*Y)+3.1447)
*      TEST(J)=2
*      GO TO 13
*
* 12  JHT=0.022*BRE**0.8
* 13  HIO=JHT*(BCT/D)*BPR**0.4
*      HO=BATEX(J,3)/(BATEX(J,1)-T)
*      TEST(J)=2
*      CONT(J)=0
*      TW=HO*(BATEX(J,1)-T)/(HIO+HO)+T
*      BVISCR=495.E-4
*
* 17  BTR=TW/(1.8*647.31)
*      BVIS=0.4725541*BTR**0.8181473*BVISCR*2.42
*      BBVISS=BVIS/3600.
*      HIO=HIO*(BVISS/BBVISS)**0.14
*      BTW=HO*(BATEX(J,1)-T)/(HIO+HO)+T
*      C=ABS(BTW-TW)
*      IF(C.LE.2.000000)GO TO 14
*      TW=BTW*(BTW/TW)
*      CONT(J)=CONT(J)+1
*      GO TO 17
*
* 14  U=1./(BRDE+BRDT+1./HIO+1./HO+BRW)
*      BAUG(J,NI)=U
*      BAHIO(J,NI)=HIO
*      BATW(J,NI)=TW
*      IF(NI.GT.1.AND.J.GE.L2) GO TO 15
*      DTUX=3.1416*D*BAUG(J,NI)*(BATEX(J,1)-T)/(W*BCP)
*      DELX=BATEX(J,2)
*      T=T+DTUX*DELX
*
* 15  BATVA(J,NI)=T
* 100 CONTINUE
* 550 RETURN
*      END
*
C::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

```

F COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

C.....

C SUBROUTINA PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION FRICCIONAL Y
C DE MOMENTUM HACIENDO USO DE METODOS TANTO RIGUROSOS COMO EM-
C PIRICOS.

C VARIABLES PRINCIPALES:

C ITC INDICE DE TIPO DE CALCULO DE CAIDA DE PRESION
C 1: CABEZAL
C 2: TUBO+CONTRACCION
C 3: TUBO RECTO
C 4: TUBO+EXPANSION
C 5: TUBO+CONTRACCION+EXPANSION
C PDI CAIDA DE PRESION CABEZAL INFERIOR (PSI)
C PDS CAIDA DE PRESION CABEZAL SUPERIOR (PSI)
C PDIP CAIDA DE PRESION TRAMO RECTO (PSI)
C PDCO CAIDA DE PRESION CONTRACCION (PSI)
C PDLX CAIDA DE PRESION EXPANSION (PSI)
C G MASA VELOCIDAD (LB/SEGFT2)
C VI VELOCIDAD A LA ENTRADA DEL INTERVALO (FT/SEG)
C VO VELOCIDAD A LA SALIDA DEL INTERVALO (FT/SEG)
C F FACTOR DE FRICCION (DEFINICION DE FANNING)

C SUBROUTINE CAPRE

C COMMON /RC1/ IIM,ATVI,ATVO,AAL,AD,AW,APME,AU,ATS,IITC,IM,APDI,
C IAPUTR,APUS,APDCO,APDEX,APTEC,AWTC,ADMA,AWTT,ADMI,ACK(8,4)
C COMMON /RC11/ AG,AVO,AVI,AF,AVE,ADENI,

C IADENO,ADENP,AVP

C CALL PROPIE(AW,AD,ATVI,APME,ATVO,ACP,AVISS,ARE)

C GO TO (10,10,20),IIM

10 CD=ABS(ATVI/ATVO-1.)

C IF(CD.GT.0.4) GO TO 1

CPC=(AG*(AVO-AVI)/32.2)+2.*AF*AVE*AAL*AG**2/(32.2*AD)

C GO TO 3

1 K=ABS(ATVI-ATVO)

C IF(R.61,00.000) GO TO 2

CPC=(AG**2*ALOG(ADENI/ADENO)/(32.2*ADENP))+2.*AF*AAL*AG**2/

C 1(32.2*AD*ADENP)

C GO TO 3

2 CPC=(AG*(AVO-AVI)/32.2)+(1800.*1.*10.72/(32.2*18.016))*AF*ACP*

C IAG**3/(APME*AU)*(ATVI-ATVO+ATS*ALOG((ATVI-ATS)/(ATVO-ATS)))

3 IF(IITC.LE.1) GO TO 4

C APUTR=CPC

C GO TO 6

4 IF(IM.LE.1) GO TO 5

C APUS=CPC

C GO TO 30

5 APDI=CPC

C GO TO 30

20 AG1=4.*AWTC/(3.1416*3600.*ADMA**2)

C AG2=4.*(AWTC-AWTT)/(3.1416*3600.*ADMA**2)

C CPM=4.*AF*AAL*AG**2/(2.*32.2*AD*ADENP)+ABS((AG1**2-AG2**2)/

C IADENP)/(2.*32.2)

C CPT=4.*AF*AAL*AG**2/(AD*2.*32.2*ADENP)

C IF(IITC.LE.1) GO TO 6

C APUTR=CPT

C GO TO 6

6 IF(IM.LE.1) GO TO 7

C APUS=CPM

C GO TO 30

7 APDI=CPM

C GO TO 30

8 GO TO(30,30,40,60,30),IITC

30 GO TO(70,80,80),IIM

```

80 Y=AWTT/AWTC
   X=ADMI/ADMA
   DO 9 I=1,5
   IF(X-ACK(I,1)) 9,90,100
9   CONTINUE
   J=5
   GO TO 11
90  J=1
   KJ=0
   GO TO 11
100 J=J-1
   KJ=1
11  AK1=ACK(J,2)+ACK(J,3)*Y+ACK(J,4)*Y*Y
   IF(KJ.LE.0) GO TO 12
   AK2=ACK(J+1,2)+ACK(J+1,3)*Y+ACK(J+1,4)*Y*Y
   AK=(AK1+AK2)/2.
12  AK=AK1
   APUCO=-AK*ADENP*AVP**2/(2.*32.2)
   GO TO 13
70  APUCO=-AVL*AG**2/(4.*32.2)
13  IF(IITC.LT.5) GO TO 200
   GO TO 14
60  APUCO=0.
   Y=AWTT/AWTC
   X=ADMI/ADMA
14  GO TO(500,400,400),IIM
400 DO 15 I=0,8
   IF(X-ACK(I,1)) 15,500,600
15  CONTINUE
   J=8
   GO TO 16
500 J=1
   KJ=0
   GO TO 16
600 J=J-1
   KJ=1
16  AK1=ACK(J,2)+ACK(J,3)*Y+ACK(J,4)*Y*Y
   IF(KJ.LE.0) GO TO 17
   AK2=ACK(J+1,2)+ACK(J+1,3)*Y+ACK(J+1,4)*Y*Y
   AK=(AK1+AK2)/2.
17  AK=AK1
   APDEX=AK*ADENP*AVP**2/(2.*32.2)
   GO TO 18
300 APDEX=AVE*AG**2/(2.*32.2)
   GO TO 18
200 APDEX=0.
   GO TO 18
40  APUCO=0.
   APDEX=0.
18  APTEC=APUTR+APUCO+APDEX
50  RETURN
   END
C:.....

```

COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

```

C::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
C   SUBROUTINE PARA LA DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES FISICAS
C   DEL FLUIDO Y NUMEROS ADMENSIONALES REQUERIDOS
C   VARIABLES PRINCIPALES:
C   VE   VOLUMEN ESPECIFICO PROMEDIO (FT3/LB)
C   DEN  DENSIDAD PROMEDIO (LB/FT3)
C   CP   CAPACIDAD CALORIFICA (BTU/LB)
C   VP   VELOCIDAD PROMEDIO (FT/SEG)
C   RE   NUMERO DE REYNOLDS
C   PR   NUMERO DE PRANDTL
C   SUBROUTINE PROPIE(CW,CD,CTVI,CPME,CTVO,CCP,VISS,CRE)
COMMON /RC11/ CG,CVO,CVI,CF,CVE,CDENI,CDENO,
1CDENP,CVP
COMMON /RC21/ CCT,CPR
CG=4.*CW/(3.1416*3600.*CD**2)
CVEI=10./2*CTVI/(18.016*CPME)
CVEO=10./2*CTVO/(18.016*CPME)
CVE=(CVEI+CVEO)/2.
CDENI=1./CVEI
CDENO=1./CVEO
CDENP=1./CVE
CVO=CG+CVEO
CVI=CG*CVEI
CVP=(CVO+CVI)/2.
CTVP=(CTVI+CTVO)/2.
XTVP=CTVP-460.
YTVP=(XTVP-32.)/1.8
CCF=(7.7*0.04594E-2*YTVP+0.2521E-5*YTVP**2-0.8587E-9*YTVP**3)
1/18.016
CCT=(XTVP**2-600.*XTVP+8.E4)*0.0132/61824.-(XTVP**2-432.*XTVP
1+128.E2)*0.0159/33600.+(XTVP**2-232.*XTVP+6.4E3)*0.0199/73600.
VISC=495.E-4
TR=CTVP/(1.8*647.31)
VIS=0.4725541*TR**0.8181473*VISC*2.42
VISS=VIS/3600.
CPR=CCP*VIS/CCT
CRE=CD*CVP*CDENP/VISS
IF(CRE.LE.30000.)GO TO 3
VCRE=CRE**-.20
CF=0.046*CRE**-.20
GO TO 5
3 VCRE=CRE**-.25
CF=0.079*CRE**-.25
5 RETURN
END
C::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

```

COMPLATION: NO DIAGNOSTICS.

```

C::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
C   SUBROUTINA PARA GRAFICAR LOS PERFILES RESULTADO DE LA SIMULA-
C   CION.  LOS PERFILES YA MENCIONADOS EN EL PROGRAMA PRINCIPAL
C   MUESTRAN SU APLICACION EN EL DISEÑO TERMICO Y MECANICO DEL
C   EQUIPO.
C   SUBROUTINE PERFIL(AUG,AHIO,ATW,ATVA,AFWT,NUT,IFL)
C   DIMENSION AUG(10,100),AHIO(10,100),ATW(10,100),ATVA(10,100)
C   1,AFWT(110),X(100),Y(100),G(10,100)
114 FORMAT(4(5X,E14.7))
115 FORMAT(10(5X,F5.1))
116 FORMAT(7(2X,E14.7))
1000 FORMAT(2(5X,E14.7))
      N=NUT
      GO TO (253,254),IFL
253  NPROB=3
      GO TO 256
254  NPROB=5
255  IPLRF=5
      DO 2 J=1,IPLRF
      DO 1003 N21=1,100
      Y(N21)=0.0
1005 CONTINUE
      GO TO (5,10,15,20,25),J
      DO 6 L1=1,NUT
      Y(L1)=AFWT(L1)
      GO CONTINUE
      GO TO 17
10  DO 7 L2=1,NPROB
      DO 8 L3=1,NUT
      G(L2,L3)=ATVA(L2,L3)
      GO CONTINUE
      GO CONTINUE
      GO TO 17
15  DO 9 L4=1,NPROB
      DO 11 L5=1,NUT
      G(L4,L5)=ATW(L4,L5)
      GO CONTINUE
      GO CONTINUE
      GO TO 17
20  DO 12 L6=1,NPROB
      DO 13 L7=1,NUT
      G(L6,L7)=AHIO(L6,L7)
      GO CONTINUE
      GO CONTINUE
      GO TO 17
25  DO 14 L8=1,NPROB
      DO 16 L9=1,NUT
      G(L8,L9)=AUG(L8,L9)
      GO CONTINUE
      GO CONTINUE
      GO TO 17
17  IF(J.GT.1) GO TO 70
      ICASO=1
      GO TO 79
70  ICASO=NPROB+1
79  DO 99999 IPRUB=1,ICASO
      IF(J.GT.1) GO TO 19
      DO 77 LLL=1,NUT
      X(LLL)=LLL
77  CONTINUE
      GO TO 21
19  IF(IPRUB.GT.1) GO TO 24

```

```

X(1)=1.0
X(2)=95.0
D=0(1,1)
A=0(1,1)
DO 31 NN=1,NPROB
DO 32 I=1,NUT
B=AMAX1(0(NN,I),A)
C=AMIN1(0(NN,I),D)
IF(A.GE.B) GO TO 37
A=B
37 IF(D.LE.C) GO TO 32
J=C
32 CONTINUE
31 CONTINUE
Y(1)=D
Y(2)=A
GO TO 27
24 DO 1 L=1,NUT
X(L)=L
1 CONTINUE
IS=IPROB
I6=IS-1
DO 18 J10=1,NUT
Y(J10)=G(10,J10)
18 CONTINUE
27 IF(IPROB.NE.1) GO TO 99
21 GO TO (111,112,113,117,118),J
111 CALL PLOT(1.0,-40.0,-3)
GO TO 22
112 CALL PLOT(0.0,20.0,-3)
GO TO 22
113 CALL PLOT(17.0,-40.0,-3)
GO TO 22
117 CALL PLOT(0.0,20.0,-3)
GO TO 22
118 CALL PLOT(17.0,-40.0,-3)
22 CALL PLOT(0.0,2.5,-3)
CALL PLOT(0.0,18.166,2)
CALL PLOT(14.166,18.166,2)
CALL PLOT(14.166,0.0,2)
CALL PLOT(0.0,0.0,2)
CALL PLOT(1.083,1.083,-3)
CALL PLOT(0.0,16.0,2)
CALL PLOT(12.0,16.0,2)
CALL PLOT(12.0,0.0,2)
CALL PLOT(0.0,0.0,2)
CALL PLOT(1.0,1.0,-3)
CALL MUIP(9.0,2.0,1.0,0.0)
GO TO (30,35,40,45,50),J
30 CALL SYMBOL(1.0,14.5,0.28,31)HPERFIL DE DISTRIBUCION DE FLUJO,
10.0,31)
GO TO 42
35 CALL SYMBOL(1.0,14.5,0.28,27)HPERFILES DE TEMP. DEL VAPOR,
10.0,27)
GO TO 41
40 CALL SYMBOL(1.0,14.5,0.28,26)HPERFILES DE TEMP. DE PARED,0.0,26)
GO TO 41
45 CALL SYMBOL(1.0,14.5,0.28,30)HPERFILES DE COEF. INT. (TUBOS),
10.0,30)
GO TO 41
50 CALL SYMBOL(1.0,14.5,0.28,24)HPERFILES DE COEF. GLOBAL,0.0,24)

```

```

41 CALL SYMBOL(2.5,13.5,0.14,20H1. ZONA 1 (CABEZAL),0.0,20)
   CALL SYMBOL(2.5,13.0,0.14,17H2. ZONA 2 (TUBO),0.0,17)
   GO TO (257,256),1FL
256 CALL SYMBOL(2.5,12.5,0.14,17H3. ZONA 3 (TUBO),0.0,17)
   CALL SYMBOL(2.5,12.0,0.14,17H4. ZONA 4 (TUBO),0.0,17)
   CALL SYMBOL(2.5,11.5,0.14,20H5. ZONA 5 (CABEZAL),0.0,20)
   GO TO 42
257 CALL SYMBOL(2.5,12.5,0.14,20H3. ZONA 3 (CABEZAL),0.0,20)
42 CALL SCALE(X,10.0,N,+1)
   CALL SCALE(Y,14.0,N,+1)
   CALL AXIS(0.0,0.0,11HTUBO NUMERO,-11,10.0,0.0,X(N+1),X(N+2))
   GO TO (60,05,70,75,80),J
60 CALL AXIS(0.0,0.0,19HGASTO VAPOR (LB/HR),+19,14.0,90.0,
  1Y(N+1),Y(N+2))
   GO TO 01
65 CALL AXIS(0.0,0.0,19HTEMP. VAPOR (GR. R),+19,14.0,90.0,
  1Y(N+1),Y(N+2))
   GO TO 01
70 CALL AXIS(0.0,0.0,19HTEMP. PARED (GR. R),+19,14.0,90.0,
  1Y(N+1),Y(N+2))
   GO TO 01
75 CALL AXIS(0.0,0.0,37HCOEF. INT. TUBOS (BTU/(HR*FT**2*G.F)),
  1+37,14.0,90.0,Y(N+1),Y(N+2))
   GO TO 01
80 CALL AXIS(0.0,0.0,33HCOEF. GLOBAL (BTU/(HR*FT**2*G.F)),
  1+35,14.0,90.0,Y(N+1),Y(N+2))
61 WRITE(0,114)X(N+1),Y(N+1),X(N+2),Y(N+2)
   WRITE(0,1000)(Y(I),I=1,2)
   IF(J.GI,1) GO TO 83
   GO TO 99
83 IF(IPROB.NE,1) GO TO 99
   GO TO 99999
99 CONTINUE
   CALL LINE(X,Y,N,1,0,0)
   WRITE(0,115)(X(I),I=1,NUT)
   WRITE(0,110)(Y(MM),MM=1,NUT)
99999 CONTINUE
2 CONTINUE
RETURN
END

```

.....

COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

16077P.C915