

T.  
532,053  
M516d  
1968  
F. ce. aa.

077694

Ej: 4.-

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS**

**Diseño, Construcción y Operación de  
un Aparato para Medir Factores de Fricción  
en Diferentes Condiciones de Flujo**

**TESIS PRESENTADA POR**  
**FRANCISCO JAVIER MEJIA,**  
**PREVIA OPCION AL TITULO DE**  
**DOCTOR EN QUIMICA INDUSTRIAL**

**SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA**

**JUNIO DE 1968**



~~378-228\*~~  
~~158-108\*~~  
~~158-108\*~~  
~~158-108\*~~

Eg. 2-17932



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

Dr. Angel Góchez Marín

SECRETARIO GENERAL

Dr. Gustavo Adolfo Moyola

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

DECANO

Dr. Ricardo Gavidía Castro

SECRETARIO

Dra. Rhina Lemus de Salgado

## JURADOS EXAMINADORES

### PRIMER EXAMEN GENERAL PRIVADO DE DOCTORAMIENTO:

*Dr. Mario A. Santos*

*Dr. Ovidio Vásquez Gil*

*Dra. Luz Martínez de Miralda*

### SEGUNDO EXAMEN GENERAL PRIVADO DE DOCTORAMIENTO:

*Ing. Pedro Salvador Mendoza*

*Ing. Enrique Sol Meza*

*Ing. Roberto Abrego*

### TESIS:

*Ing. Allen Donald Sherman*

*Ing. Pedro Salvador Mendoza*

*Ing. Roberto Abrego*

A mis abnegados padres:  
Con profundo amor y gratitud.

A mis hermanos:  
Con fraternal cariño.

A mis familiares.

## P R E F A C I O

El objetivo fundamental del presente trabajo, es proporcionar una guía para el estudio experimental del flujo de fluidos, cuyos principios básicos se han analizado desde el punto de vista práctico. El flujo de fluidos constituye una de las operaciones unitarias más importantes por sus múltiples aplicaciones en el campo de la tecnología. Esto necesariamente implica que debe tenerse un conocimiento amplio de las características inherentes a esta operación.

La realización de una operación en gran escala no es posible si antes no se tiene la información indispensable sobre el comportamiento más probable de la misma. Esto se logrará si se analiza la misma operación a nivel de laboratorio, con el objeto de obtener una idea general sobre dicho comportamiento, basándose en los resultados obtenidos.

No se han incluido largas consideraciones teóricas, por considerarlo de poca utilidad, pues básicamente se trata de deducir la información, de los experimentos realizados en el sistema construido para tal propósito.

En forma detallada se exponen las consideraciones sobre diseño, construcción y operación de la unidad, especificando los detalles que deben tomarse en cuenta para asegurar el funcionamiento correcto y por consiguiente la obtención de resultados satisfactorios dentro de la exactitud que pueda lograrse en las mediciones.

En la parte concerniente a los experimentos, se ha puesto énfasis especial en lo relativo al orden en que deben realizarse, o sea las etapas esenciales que deben atenderse con sumo cuidado para evitar una operación inadecuada del sistema.

Para mayor claridad, tanto en las gráficas de datos experimentales, como en las figuras del sistema y afines se han utilizado símbolos de varios tipos para identificar clases de acceso--rios utilizados y también para diferenciar unas curvas de otras en una misma gráfica.

En el apéndice se incluyen ejemplos de cálculos efec--tuados con los datos experimentales y su comparación con los calcu--lados, utilizando relaciones teóricas reportados en la literatura. También se incluye el cálculo de los errores experimentales que en la Fig. 13 aparecen en forma de una área sombreada.

El sistema se construyó para ser utilizado con fines experimentales, por tanto queda abierta la posibilidad de introdu--cir modificaciones tendientes a mejorar los procedimientos, inclu--so instalar equipo adicional para extender su uso a otros experi--mentos no contemplados en este trabajo.

## AGRADECIMIENTO

Patentizo mi sincero agradecimiento a las siguientes personas.

Ing. Allen Donald Sherman, bajo cuya supervisión se realizó el presente trabajo. Revisó cuidadosamente el manuscrito original, haciendo valiosas sugerencias sobre el contenido y ordenamiento del material.

Ing. Pedro Salvador Mendoza e Ing. Roberto Agregó, por sus acertadas observaciones hechas al revisar el manuscrito original.

Arq. Inf. Rosa María Zúñiga, por su decidida colaboración y apoyo moral otorgado en todo momento.

Br. Francisco A. Ortiz, quien prestó su colaboración en la operación del sistema, durante la realización de los experimentos.

Finalmente, quiero agradecer a todas aquellas personas que contribuyeron con su ayuda en el desarrollo físico del presente trabajo.

INDICE DE MATERIAS

	<u>Pág.</u>
Prefacio	IV
1 - Introducción	1
2 - Diseño	8
3 - Descripción del aparato	22
4 - Construcción	24
5 - Lista de material utilizado	30
6 - Parte Experimental	32
7 - Experimentos	34
8 - Pérdidas de Presión por fricción en tubos y accesorios	39
9 - Tabulación de Resultados Experi- mentales	42
10 - Discusión de Resultados	62
11 - Conclusiones	66
12 - Apéndice	67
Ejemplos de cálculos efectuados	67
Cálculo de los factores de fric- ción utilizando los datos expe- rimentales	71
Cálculo de errores experimenta- les	74
Cálculo de pérdidas de presión por fricción en tubos y acceso- rios por medio de ecuaciones reportadas en la literatura	80
Nomenclatura	86
13 - Bibliografía	89



INDICE DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1 Sistema General de Flujo	2
FIGURA 2 Pérdidas por Contracción	7
FIGURA 3 Diagrama Esquemático del Aparato de Flujo de Fluidos	18
FIGURA 4 Diagrama Esquemático de los Manómetros	21
FIGURA 5 Detalles de Construcción	29
FIGURA 6 Curva de calibración del medidor de orificio Q(pies <sup>3</sup> /seg) vrs $\Delta h$ , pulg. Hg	54
FIGURA 7 Curvas de calibración del medidor de orificio, velocidad, pies/seg vrs $\Delta h$ , pulg Hg	55
FIGURA 8 Curvas de calibración teórica del medidor de orificio para tubos 1" y 1/2", en base a datos experimentales para tubo 1/2"	56
FIGURA 9 Pérdidas de presión por fricción en válvula 1/2" y tubo recto 1/2"	57
FIGURA 10 Pérdidas de presión por fricción en acoplamiento 1/2" y tubo recto 1/2"	58
FIGURA 11 Pérdidas de presión por fricción en accesorios de 1": bridas, expansión y reducción	59
FIGURA 12 Pérdidas de presión por fricción en válvula de compuerta de 1/2"	60
FIGURA 13 Factores de fricción de Fanning calculados de los datos experimentales y comparados a los ya reportados	61

INDICE DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
TABLA I	42
TABLA II	44
TABLA III	46
TABLA IV	47
TABLA V	48
TABLA VI	52

## INTRODUCCION

Los experimentos más comunes en el estudio práctico del flujo de fluidos son:

1. Determinación del flujo másico y volumétrico mediante el uso de medidores apropiados.
2. Cálculo de la velocidad lineal del flujo, usando las relaciones anteriores.
- 3.- Curvas de calibración de diferentes tipos de medidores.
4. Determinación de caídas de presión por fricción en tubos y accesorios.

Si no se dispone del sistema de flujo apropiado, el primer paso es diseñar el sistema más conveniente y elegir el tipo o tipos de medidores de flujo; luego proceder al montaje de acuerdo al diseño. Antes de determinar las caídas de presión por fricción, deben disponerse de las curvas de calibración de los medidores con lo cual se ahorran operaciones y cálculos numéricos. Por tanto, la construcción de dichas curvas procederá a cualquier otra determinación.

## ECUACIONES FUNDAMENTALES

En los párrafos siguientes se incluyen algunas de las ecuaciones fundamentales y principios del flujo de fluidos.

1. Balance de Materia o principio de conservación de la masa. Aplicada al flujo de un fluido incompresible en estado estable, se encuentra que la masa fluyendo en una sección del sistema es constante si se determina en otra situada muy distante.



FIG. 1 - SISTEMA GENERAL DE FLUJO

Matemáticamente puede representarse por la siguiente ecuación:

$$w = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \text{constante.}^{(5,14)} \quad (1)$$

La ecuación (1) es conocida como "ecuación de continuidad"

2. Balance de Energía Mecánica o Ecuación de Bernoulli.<sup>(1,2,9,14,17)</sup>

La ecuación de Bernoulli es aplicable al flujo de fluidos e incluye los diferentes tipos de energía mecánica de un fluido en movimiento.

Para un fluido incompresible, la ecuación se representa así:

$$P/\rho + g/g_c Z + u^2/2g_c = \text{constante} \quad (2)$$

Entre dos secciones de un sistema de flujo (fig.1), la ecuación es:

$$P_1/\rho_1 + g/g_c Z_1 + 2u_1^2/2g_c = P_2/\rho_2 + g/g_c Z_2 + u_2^2/2g_c \quad (3)$$

Puede decirse que la ecuación (3) es idealizada, pues no incluye pérdidas por fricción. Cada uno de sus términos representa efectos de energía mecánica en base a la unidad de masa fluyendo. Así el término  $P/\rho$  es el trabajo dado por fuerzas externas al fluido pa

ra forzarlo a entrar al sistema;  $g/g_c z$  y  $v^2/2g_c$  representan los efectos mecánico-potencial y mecánico-cinético del fluido por su posición y velocidad con respecto a un plano arbitrario tomado como referencia.

Cuando un fluido fluye dentro de un tubo, ocurren efectos de fricción contra las paredes del tubo, manifestándose por efectos térmicos provenientes de la transformación de energía mecánica en calor.

Se deduce de lo anterior que (2) ya no es constante a lo largo del tubo sino que disminuye en la dirección del flujo; pero de acuerdo a la ley de la conservación de la energía, esta disminución deberá aparecer necesariamente en forma de calor.

La ecuación (3) debe corregirse, incluyendo en ella el término  $H_f$  que representa los efectos de fricción, considerándose siempre positivo:

$$P_1/\rho_1 + g/g_c z_1 + u_1^2/2g_c = P_2/\rho_2 + g/g_c z_2 + u_2^2/2g_c + H_f \quad (4)$$

A diferencia de todos los otros términos,  $H_f$  representa la transformación de energía mecánica en calor en todos los puntos situados entre "1" y "2".

Siendo  $H_f$ , energía que se disipa como calor a los alrededores, conviene compensar dicha pérdida introduciendo una bomba cuya finalidad es aumentar la energía mecánica del fluido para mantener el flujo. La introducción del término  $-W_s$  en (4) representa el trabajo dado por la bomba, quedando la ecuación transformada en la siguiente:

$$P_1/\rho_1 + g/g_c z_1 + u_1^2/2g_c - W_s = P_2/\rho_2 + g/g_c z_2 + u_2^2/2g_c + H_f \quad (5)$$

Tipos de fricción. Dos tipos de fricción se conocen y ambos son originados por el contacto del fluido con superficies sólidas tal como las paredes del ducto donde el fluido está fluyendo.

La fricción de superficie se origina en las capas limitantes del fluido en contacto con las superficies sólidas, lo cual ocurre en toda la longitud del tubo. La característica fundamental de este tipo de fricción es que la capa limitante en ningún momento rompe contacto con el sólido. La fricción de forma ocurre con separación de la capa limitante del sólido. Es común encontrar este tipo de fricción en sólidos sumergidos en la corriente, tales como: esferas, anillos y otras formas comunes. Inmediatamente después del sólido se originan remolinos cuya energía cinética es tomada de la corriente y disipada como calor. El término  $H_f$  en (5) incluye ambos tipos, no haciendo distinción alguna.

Fricción en tubos rectos y largos.<sup>(5,9)</sup> Cuando un fluido fluye a bajas velocidades se tiene flujo laminar y las pérdidas por fricción en este tipo de flujo se relacionan a las otras variables por la ecuación de Hagen-Poiseuille, cuya derivación matemática puede verse en "Transport Phenomena" por Bird, et.al.<sup>(1)</sup>

La forma integrada de la ecuación es:

$$H_{fs} = \frac{32 \mu Lu}{g_c D^2 \rho} \quad (6)$$

Para flujo turbulento, la ecuación (6) no es aplicable y la relación entre  $H_f$  y las otras variables se obtiene por análisis dimensional, siendo su forma final:

$$\frac{H_f D g_c}{Lu^2} = \phi (Re) \quad (7)$$

La ecuación (7) sólo indica que la cantidad de la izquierda es función de  $Re$  sin precisar valores.

Para establecer la relación entre  $H_f$  y  $Re$  se ha definido un factor de fricción "f" por la ecuación:

$$f = \frac{H_f D g_c}{2 L u^2} = \frac{\phi (Re)}{2} \quad (8)$$

o bien: 
$$H_f = \left| \frac{4fL u^2}{D 2g_c} \right| \quad (9)$$

La ecuación (9) es más conocida como ecuación de Fanning y es aplicable cuando el flujo es turbulento.

Combinando (9) con (6) se obtiene una ecuación para  $f$  en flujo laminar, ésta es:

$$\frac{4 f L u^2}{D 2g_c} = \frac{32 \mu L u}{D^2 \rho g_c} \quad (10)$$

de donde por simplificación:

$$f = 16/Re \quad (11)$$

Una ecuación que relaciona el factor de fricción  $f$  en flujo turbulento y el  $Re$  fue derivada por Koo:

$$f = 1.4 \times 10^{-3} + 0.125 (Re)^{-0.32} \quad (Re: 3 \times 10^3 \rightarrow 3 \times 10^6) \quad (12)$$

Para el intervalo  $Re: 5 \times 10^3 \rightarrow 2 \times 10^5$  puede utilizarse:

$$f = 0.042 (Re)^{-0.2} \quad (13)$$

Von Kármán reportó una ecuación para  $f$  así:

$$1/f^{0.5} = 4 \log (Re f^{0.5}) - 0.4 \quad (14)$$

Las ecuaciones (13) y (14) sólo son aplicables al flujo en tubos lisos tales como de cobre, vidrio, etc.

Para tubos comerciales (14) se modifica a:

$$1/f^{0.5} = 3.2 \log Re f^{0.5} + 1.2 \quad (15)$$

Otras pérdidas por fricción. <sup>(1,3,9,11)</sup> Además de las pérdidas antes mencionadas, existen otras cuya magnitud debe tomarse en cuenta.

- a) Expansión súbita del área seccional de flujo
- b) Contracción súbita del área seccional de flujo
- c) Resistencia de diferentes tipos de accesorios, tales como, válvulas, codos, tees, etc.

#### EXPANSIÓN SUBITA.

Si el diámetro del tubo cambia bruscamente a uno mayor, el área de flujo aumenta y la velocidad disminuye, originándose una turbulencia que transforma parte de la energía cinética en calor.

Las pérdidas por fricción originadas en una expansión súbita pueden representarse por la ecuación:

$$H_{fe} = K_e u^2 / 2g_c \quad (16)$$

donde:  $K_e$  = coeficiente de expansión  
 $u$  = velocidad en el tubo pequeño

El valor de  $K_e$  varía según el tipo de flujo, pues depende de la relación de áreas y de  $Re$ .

Para flujo laminar,  $K_e$  es dado por

$$K_e = 1 - 2.667 A_1/A_2 + (A_1/A_2)^2 \quad (17)$$

y para flujo turbulento:

$$K_e = (1 - A_1/A_2)^2 \quad (18)$$

Para calcular las pérdidas por fricción ocasionadas por una contracción súbita, se usa la ecuación:

$$H_{fc} = K_c u_2^2 / 2g_c \quad (19)$$



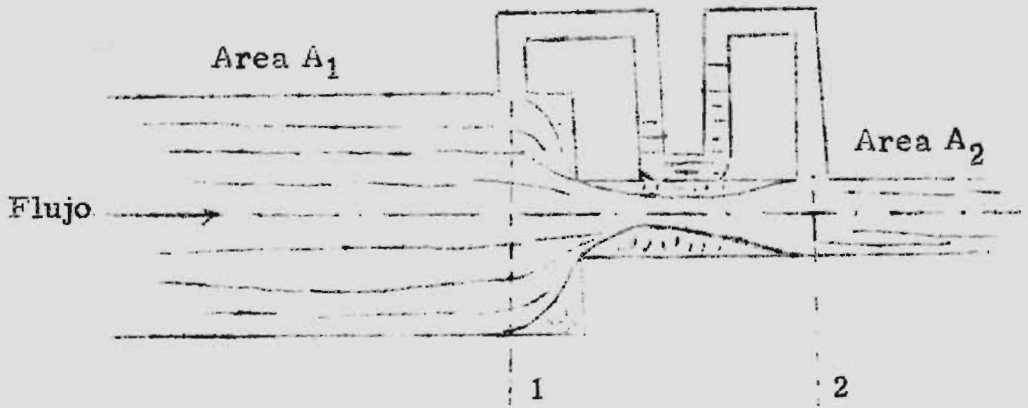


Fig. 2,- PERDIDAS DE PRESION EN UNA CONTRACCION SUBITA.

donde  $K_c$  = coeficiente de contracción.

$u_2$  = velocidad del fluido en la sección menor.

Ecuaciones similares se aplican a las pérdidas por fricción en accesorios, las cuales se expresan en longitudes equivalentes de tubo recto.

## DISEÑO

Consideraciones Generales. El diseño de un sistema, cualquiera que sea su finalidad, implica la necesidad de analizar todo lo que se relacione a sus detalles esenciales que varían según los fines propuestos. En el caso presente, establecidos los experimentos que debían realizarse, se procedió a considerar la disponibilidad de materiales y su costo; recurriendo para ello a cotizar precios en diferentes casas comerciales para comparar tanto la calidad como el precio relativo de los mismos. El diseño final del sistema, fue el resultado de una serie de modificaciones al originalmente concebido. Al principio se pensó construir un sistema donde el flujo debería ser por gravedad y evitar el uso de una bomba. Se calculó previamente el flujo mínimo necesario y a continuación se procedió a realizar pruebas sobre la presión del agua disponible, comprobando que no era suficiente para mantener el flujo requerido.

Rechazada la posibilidad anterior, se diseñó un sistema, en el cual se incluía una bomba que permitiera obtener el flujo deseado. Para evitar en lo posible el desperdicio de agua, inevitable si tanto el tanque de suministro como el de mediciones se sitúan en el mismo plano; se dispusieron en tal forma que el tanque de mediciones puede drenarse mediante una válvula que descarga en el tanque de alimentación.

Selección del tamaño de la bomba. Antes de instalar una bomba, conviene analizar cuidadosamente las condiciones de operación mediante cálculos previos. A continuación se exponen las más importantes etapas a seguir:

- a) Asumir el máximo número de Reynolds con el cual se desea trabajar.
- b) Calcular la velocidad lineal del flujo a partir de:

$$Re = D u \rho / \mu$$

- c) Calcular el flujo máximo, conociendo el área seccional del tubo.
- d) Determinar la longitud de tubo recto disponible entre succión y descarga.
- e) Establecer el tipo y número de accesorios incluidos en el trayecto del flujo.
- f) Expresar la resistencia al flujo de estos accesorios en función de longitudes equivalentes a tubo recto.
- g) Establecer un balance de energía mecánica entre succión y descarga.
- h) Calcular de dicho balance, el trabajo que debe desarrollar la bomba.

Cálculos Preliminares. Diámetro de tubo =  $1\frac{1}{2}$ " (nominal)

Longitud de tubo recto disponible = 40 pies

Plano de referencia: superficie del agua en el tanque de alimentación.

Presión atmosférica en ambas puntos de referencia:  $P_1 = P_2$

Velocidad considerada despreciable en el punto: "1"

Altura del punto "2" con relación al "1" = 6 pies

En base a las consideraciones anteriores, el balance de energía mecánica entre "1" y "2" se reduce a:

$$-W_s = g/g_c Z_2 + u_2^2/2g_c + H_f \quad (1)$$

$H_f$  = pérdidas totales por fricción en tubo recto y accesorios.

No. de Reynolds máximo de operación =  $2 \times 10^5$  (asumido)

Temperatura promedio ambiente = 80°F

Viscosidad del agua a 80°F = 0.862 cp.

Densidad del agua a 80°F = 62.22 lbm/pie<sup>3</sup>

Cálculo de la velocidad a partir del número de Reynolds

$$Re = D u \rho / \mu \quad (2)$$

de donde:

$$u = Re \mu / \rho D$$

Diámetro interno del tubo = 1.61 pulg.

Sustituyendo valores en la igualdad anterior

$$u = \frac{2 \times 10^5 \times 0.862 \times 6.72 \times 10^{-4} \times 12}{62.22 \times 1.61} \left| \frac{\frac{\text{lbm}}{\text{pie} \cdot \text{seg}}}{\frac{\text{lbm}}{\text{pie}^3} \times \text{pies}} \right|$$

$$u = 13.8 \text{ pies/seg.}$$

Cálculo del flujo máximo en gal/min.

Area seccional interna del tubo = 0.01414 pies<sup>2</sup>

$$Q = u A \quad (3)$$

$$Q = 13.8 \text{ pies/seg} \times 0.01414 \text{ pies}^2 \times 7.48 \text{ gal/pie}^3 \times 60 \text{ seg/min}$$

$$Q = 88.2 \text{ gal/min.}$$

Cálculo del flujo másico, lbm/min.

$$w = \rho u A \quad (4)$$

$$= 62.22 \text{ lbm/pie}^3 \times 13.8 \text{ pies/seg} \times 0.01414 \text{ pies}^2$$

$$w = 12.2 \text{ lbm/seg.}$$

Cálculo de las pérdidas totales por fricción:

Las pérdidas totales por fricción en tubo recto y accesorios pueden calcularse usando la ecuación (9).

$L =$  longitud de tubo recto + longitud equivalente en pies de los accesorios.

Tipo y número de accesorios <sup>(2,3,9,11)</sup>	Longitud equivalente en diámetro de tubo
1 codo standard (radio corto)	32
2 codos de 45°	30
6 tees standard con flujo directo	360
1 tee standard con flujo en rama	90
1 válvula de globo (abierta totalmente)	300
3 válvulas de compuerta abiertas	21
TOTAL	$\frac{21}{833} \times 1.61/12 = 112$ pies

$$\text{Longitud total} = 40 \text{ pies} + 112 \text{ pies} = 152 \text{ pies}$$

Para  $Re = 2 \times 10^5$ , el valor de  $f$  leído de la gráfica  $f$  vs.  $Re^{(8)}$  es = 0.0055, sustituyendo valores en la ecuación (9) se encuentra:

$$H_f = \frac{5.5 \times 10^{-3} \times 152 \times 190 \times 2 \times 12}{1.61 \times 32.2} \left( \frac{\text{pies} \times \frac{\text{pies}^2}{\text{seg}^2}}{\text{pies} \times \frac{\text{lb}_m \text{-pie}}{\text{lb}_f \text{-seg}^2}} \right)$$

$$H_f = 75 \text{ lb}_f \text{-pie}/\text{lb}_m$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de energía mecánica reducida a las condiciones de operación se obtiene para  $H_f$ :

$$-W_s = g/g_c \cdot 6 + 190/64.4 + 75$$

$$-W_s = (6 + 3 + 75) \frac{\text{pies-lb}_f}{\text{lb}_m}$$

$$-W_s = 84 \text{ pies-lb}_f/\text{lb}_m$$

Cálculo de la potencia teórica de la bomba <sup>(3,9,C)</sup>

$$P = W_s w \tag{5}$$

$$P = 84 \text{ lb}_f \text{-pies}/\text{lb}_m \times 1 \text{ H.P.}/550 \text{ pies-lb}_f/\text{seg} \times 12.2 \text{ lb}_m/\text{seg}$$

$$P = 1.36 \text{ H.P.}$$

Para una cabeza total de 75 pies y 88 gal/min debe instalarse una bomba de 2.3 H.P. operando con eficiencia de 60% (asumida). En vez de comprar una bomba de las características antes mencionadas, se instaló en forma provisional una bomba que estaba disponible. Esta bomba es de alta capacidad y es operada con un motor de  $7\frac{1}{2}$  H. P.

Por el tipo de sistema en el cual se ha instalado, su eficiencia es bajísima obteniéndose como flujo máximo 120 gal/min contra una cabeza de 75 pies.

Diseño de los Medidores de Orificio<sup>(3,4,7,9,12,17)</sup>. Todo sistema de flujo requiere la presencia de medidores de flujo, los cuales permiten la determinación rápida de la cantidad de material fluyendo en la unidad de tiempo. Son muchos los tipos de medidores de flujo actualmente en uso y las diferencias son a veces notables, dependiendo del principio de operación de los mismos. Entre los más sencillos y cuyo principio fundamental es producir una caída de presión a expensas de cambios en velocidad, pueden citarse: medidor Venturi, medidores de orificio, medidores de boquilla, etc.

El medidor de Venturi es bastante exacto y eficiente, pues la recuperación de presión es muy grande, resiste los efectos abrasivos del fluido y no se obstruye fácilmente. Sin embargo, su costo es elevado, ocupa mucho espacio y no puede variarse su diámetro por ser fijo.

El medidor de orificio en cambio, es de bajo costo, ocupa poco espacio, puede cambiarse con mucha facilidad; no obstante estas ventajas, se daña por materiales abrasivos, gran parte de la presión no es recuperada como en el caso del medidor de Venturi.

Analizadas las características esenciales de ambos tipos, se creyó conveniente decidirse por el medidor de orificio, cuya operación no es permanente en este caso y por tanto las pérdidas de presión no constituyen un factor de importancia.

Por razones de fácil manejo e instalación, se situaron las tomas de presión en el tubo en la forma siguiente: toma de alta presión a  $2\frac{1}{2}$  diámetros (nominal) antes de la placa; toma de baja presión 8 diámetros bajo de la placa.

Para determinar el tamaño del orificio en la placa\*, se utilizó un método de prueba y error como puede verse a continuación:

-----

\*Sherman, A.D. Comunicación Personal.

1. Asumir un número de Reynolds en el orificio = 20000 =  $Re_o$

2. Asumir  $D_o = 1''$

Cálculo de la velocidad lineal en el orificio:

$$Re_o = \frac{D_o u_o \rho}{\mu}$$

de donde:

$$u_o = \frac{Re_o \mu}{D_o \rho}$$

$$u_o = \frac{2 \times 10^4 \times 0.862 \times 6.72 \times 10^{-4} \times 12}{1 \times 62.22} \left| \frac{\frac{\text{lb}_m}{\text{pie} \cdot \text{seg}}}{\text{pies} \times \frac{\text{lb}_m}{\text{pie}^3}} \right|$$

$$u_o = 2.24 \text{ pies/seg}$$

3. Flujo volumétrico en el orificio:

$$Q_o = u_o A_o$$

$$Q_o = 2.24 \text{ pies/seg} \times 3.14/4 \times 1/144 \text{ pies}^2$$

$$Q_o = 0.01200 \text{ pies}^3/\text{seg}$$

4. Cálculo de la velocidad en el tubo de  $1\frac{1}{2}''$  con el flujo volumétrico en el orificio.

$$Q_o = u_1 A_1$$

$$u_1 = Q_o/A_1$$

$$u_1 = \frac{0.01200 \text{ pies}^3/\text{seg}}{0.01414 \text{ pies}^2}$$

$$u_1 = 0.850 \text{ pies/seg}$$

5. Cálculo del número de Reynolds en el tubo:

$$Re_1 = \frac{D_1 u_1 \rho}{\mu}$$

$$Re_1 = \frac{1.61 \times 0.850 \times 62.22}{12 \times 0.862 \times 6.72 \times 10^{-4}} = 12250 \text{ (adimensional)}$$



Se construyó la placa con el diámetro calculado anteriormente y se instaló en la línea según se verá posteriormente. Se hicieron pruebas preliminares y se encontró que el manómetro conectado al medidor no era de suficiente longitud para registrar la máxima caída de presión. Por tal motivo se recalculó el diámetro de la placa, el cual fue aumentado hasta 1.063" ó 27 mm. A continuación se expone otro método de cálculo para el tamaño del orificio en la placa<sup>(a)</sup>:

El método relaciona  $D_o/D$  vrs.  $K$  teniendo como parámetros varias curvas correspondientes a los diferentes tipos de tomas de presión.

El valor de  $K$  es dado por la siguiente ecuación:

$$K = Q_m / L D_1^2 \quad (6)$$

donde

$Q_m$  = flujo máximo en gal/hr.

$D$  = diámetro del tubo en pulgadas

$h$  = máxima caída de presión, expresada en pulgadas de mercurio bajo agua.

Asumir  $h = 30$  pulg. (El manómetro tiene longitud = 39 pulg.)

$$Q_m = 88.2 \text{ gal/min} \times 60 \text{ min/1 hr.}$$

$$D = 1.61 \text{ pulg (I.D.) para el tubo}$$

"L" en la ecuación (6) es a su vez dada por:

$$L = (h \times G_1)^{1/2} (1/G_2) \quad (7)$$

donde:

$G_1$  = gravedad específica del fluido a las condiciones de operación.

$G_2$  = gravedad específica del fluido a 60°F

Los valores de  $G_1$  y  $G_2$  se calcularán relacionando las densidades a  $80^\circ\text{F}$  y  $60^\circ\text{F}$  a la máxima densidad del agua o sea  $62.43 \text{ lbm/ft}^3$

Cálculo del valor de  $L$ :

$$L = \left| 30 \text{ pulg} \times \frac{62.22 \text{ lbm/pie}^3}{62.43 \text{ lbm/pie}^3} \right|^{0.5} \times \left| \frac{1}{\frac{62.37 \text{ lbm/pie}^3}{62.43 \text{ lbm/pie}^3}} \right|$$

$$L = 5.52$$

Sustituyendo el valor de " $L$ " en (6) se encuentra que:

$$K = \frac{88.2 \times 60}{5.52 \times 1.61^2}$$

$$K = 376$$

De la gráfica <sup>(a)</sup> se encuentra que para un valor de  $K = 376$ , corresponde un valor de  $D_o/D = 0.65$  de donde  $D_o = 0.65 \times 1.61 = 1.045$  pulgadas.

El valor de  $D_o$  calculado por este método es bastante similar al calculado por el método de prueba y error.

Cálculos para el medidor de orificio pequeño:

1. Asumir  $Re_o = 2 \times 10^4$  y  $D_o = 0.15''$

$$u_o = \frac{2 \times 10^4 \times .862 \times 6.72 \times 10^{-4} \times 12}{0.15 \times 62.22} \left| \frac{\frac{\text{lbm}}{\text{pie} \cdot \text{seg}}}{\text{pies} - \frac{\text{lbm}}{\text{pies}}} \right| = 14.9 \text{ pies/seg}$$

2. Flujo volumétrico en el orificio:

$$Q_o = u_o A_o$$

$$= (14.9 \text{ pies/seg}) (3.14/4 \times 0.15^2 / 144 \text{ pies}^2)$$

$$Q_o = 0.001835 \text{ pies}^3/\text{seg}$$

3. Velocidad en el tubo de  $1\frac{1}{2}$ " con el flujo volumétrico anterior:

$$Q_0 = u_1 A_1$$

$$u_1 = Q_0 / A_1$$

$$u_1 = \frac{1.835 \times 10^{-3} \text{ pies}^3 / \text{seg}}{0.01414 \text{ pies}^2}$$

$$u_1 = 0.129 \text{ pies/seg.}$$

4. Cálculo del número de Reynolds en el tubo  $1\frac{1}{2}$ "

$$Re = \frac{1.61 \times 0.129 \times 62.22}{12 \times 0.862 \times 6.72 \times 10^{-4}} \left| \frac{\text{pies} \times \frac{\text{pies}}{\text{seg}} \frac{\text{lbm}}{\text{pie}^3}}{\frac{\text{lbm}}{\text{pie} \cdot \text{seg}}} \right| = 1860$$

Los cálculos expuestos anteriormente son el resultado de una serie de pruebas que no se han incluido por considerarlos innecesarios.

(18)  
Diseño de los Manómetros.

1. La instalación de manómetros separados para cada medidor de orificio implicaba más problemas. Por tanto, sólo se instaló un manómetro común que puede operar indistintamente con uno u otro, simplemente cerrando o abriendo las espitas que los intercomunican.

Para llegar a este arreglo final se analizaron todas las posibilidades, no encontrando algo mejor que la forma final antes mencionada.

La longitud de la columna manométrica es de 3.25 pies, siendo su suficiente para registrar la máxima deflexión del mercurio.

2. Manómetros para determinar pérdidas por fricción en accesorios. Para registrar las pérdidas por fricción en tubos y accesorios, se instalaron dos manómetros, uno de los cuales es del tipo mercurio-agua y el otro de aire-agua.

La razón por la cual se ha instalado un manómetro del tipo aire-agua, es medir en él las caídas de presión que son muy pequeñas para registrarse en un manómetro de mercurio-agua, dada la elevada densidad del mercurio. Para evitar el riesgo de derramar mercurio por un exceso de presión\*, se instalaron trampas en las salidas de los manómetros de mercurio, de modo que en el caso de sobrepasar la presión, el mercurio quedaría retenido en la trampa. Entre ambas ramas del manómetro se instaló una válvula cuya función principal, es evitar que los manómetros registren las máximas caídas de presión cuando no son utilizadas.

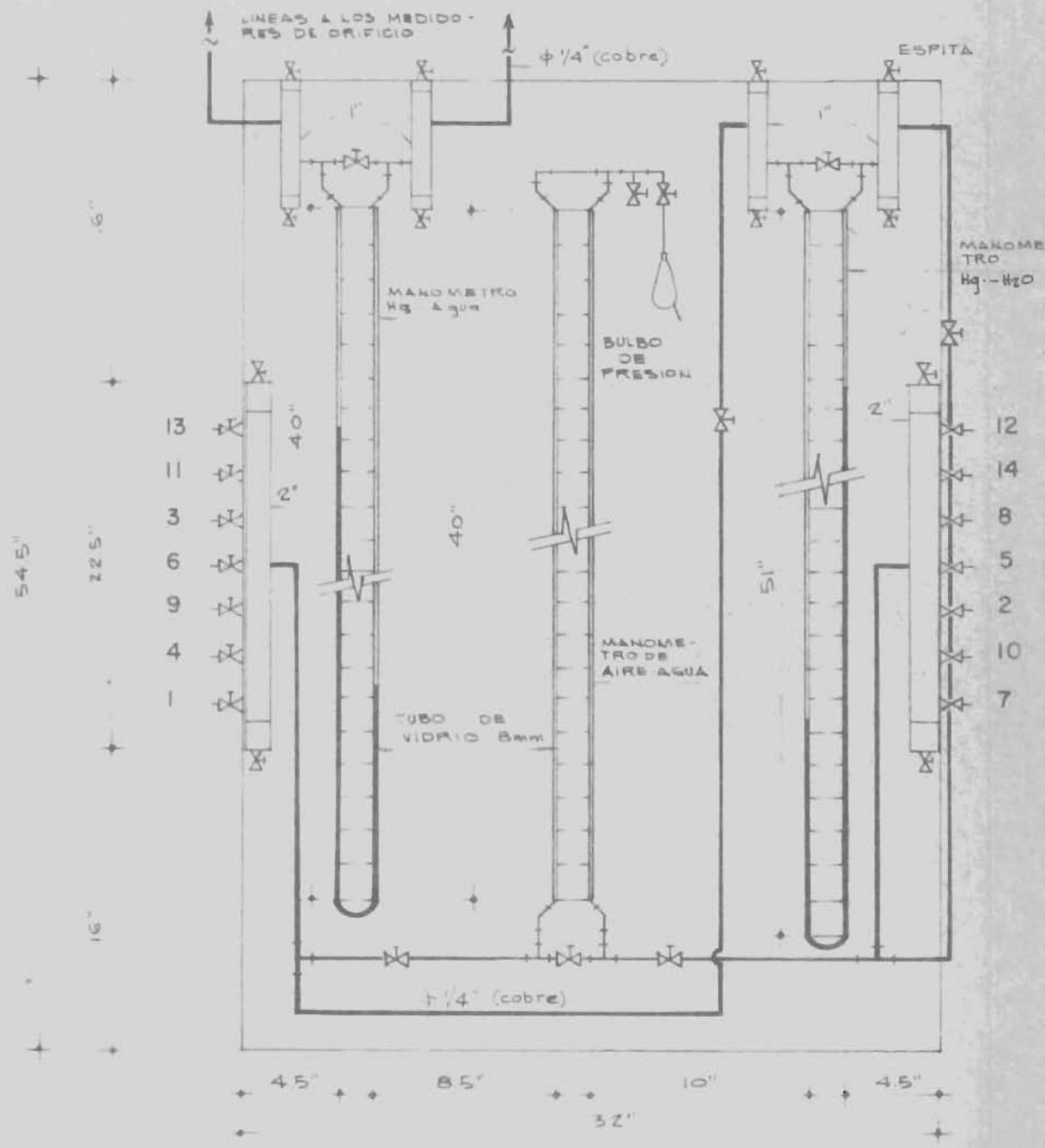
Debe mencionarse que se instalaron los manómetros, según la forma indicada anteriormente. Se probaron, habiendo constatado la ne-

---

\* Sherman, A.D. Comunicación personal.

cesidad de aumentar la longitud del manómetro de mercurio para registrar las máximas caídas en los accesorios, que en algunos son grandes.

Las diferentes líneas que conectan los puntos de alta y baja presión en cada accesorio, son de cobre y en igual número llegan a dos receptores provistos de espigas, cuyo número es igual al número de líneas.



BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LOS MANOMETROS

### DESCRIPCION DEL APARATO

Según puede verse en el diagrama general, el sistema consiste de tres secciones paralelas con diámetros diferentes y una línea de retorno que contiene los medidores de orificio. El ordenamiento en tal forma permite el paso del fluido en la parte que se desea, evitándose así, muchas pérdidas que ocurrirían en el caso que tuviera que circular por todo el sistema. Tres de las secciones tienen aproximadamente 17 pies de longitud y la línea de retorno mide en total 25 pies.

Para hacer circular el fluido en el sistema, se dispone de una bomba centrífuga provista en su línea de descarga de dos salidas que van al tanque y al sistema respectivamente. La disposición en esta forma obedece a que la bomba es de mucha potencia y durante la realización de los experimentos no se necesita todo el flujo.

Los medidores de orificio, están ubicados en la línea de retorno a la cual se ha agregado el medidor pequeño, mediante una derivación que sale y entra en dos puntos diferentes en la línea de retorno. Las caídas de presión producidas en estos medidores son registradas en el manómetro conectado mediante tubo de cobre de  $\frac{1}{4}$ ".

Justamente antes de la descarga de la línea de retorno al tanque de alimentación, están instaladas dos válvulas de cierre rápido que permiten la alimentación a ambos tanques (medición y alimentación) por su acción simultánea.

El tanque de medición o pesada, está provisto en su base de una válvula para drenar por efecto de la gravedad y posee además conectado en su base un tubo de vidrio que indica el volumen existente en cualquier momento. Esto se dispuso así, en vista de no disponer de una báscula para pesar la cantidad de fluido en tiempo variable.

El tanque de alimentación a la bomba tiene una capacidad de 110 galones y consiste de dos barriles unidos mediante soldadura eléctrica.

Las caídas de presión en los accesorios y tubo recto son registradas por dos manómetros colocados en un tablero que permite controlar en un solo sitio las caídas que están ocurriendo en puntos alejados del mismo, mediante tubo de cobre de 3/16" que conecta las tomas de alta y baja presión con los receptores situados en el tablero.

Se han instalado en varios puntos, espitas para purgar aire, siendo más notable su presencia en el tablero donde hay 6 espitas. A su vez se instalaron espitas para purgar agua cuando terminan los experimentos. El ordenamiento de las secciones de tubo poseen una configuración tal, que permite su drenaje por gravedad.



## CONSTRUCCION

En los párrafos siguientes se mencionan las etapas seguidas en la construcción y los detalles más importantes.

- 1.- Tanque de Alimentación.- Inicialmente se pensó utilizar como tanque de alimentación, un barril con capacidad de 55 galones. Sin embargo, la instalación de una bomba grande implicó aumentar, por lo menos al doble, la capacidad del tanque con el fin de no agotar el agua, lo que traería como consecuencia directa, daños en la bomba por succión de aire.

La acción corrosiva del agua es notable en las superficies internas, si éstas, no se protegen en alguna forma. Para tal fin, se utilizó una pintura anticorrosiva después de preparar las superficies.

Para poder aplicar los recubrimientos internos, fue necesario contar dos secciones antes de hacer la soldadura, pues de otra manera habría sido imposible.

2. Construcción de las Tomas de Presión.<sup>(9,11,12,18)</sup> Estando ya cortadas y roscadas en ambos extremos las diferentes secciones, se procedió a la construcción de las tomas de presión en los puntos indicados. Dichos puntos fueron fijados tomando en cuenta las distancias siguientes: 5 diámetros de tubo arriba del accesorio para la toma de alta presión y 30 diámetros abajo para la toma de baja presión; distancias que eliminan posibles perturbaciones en la distribu---ción normal del flujo.

Es recomendable para obtener resultados buenos, construir las tomas de presión, lo más pequeño posibles. Sin embargo, en el caso de ser muy pequeñas, puede surgir el problema de obstrucción por cual---quier material sólido arrastrado por el agua. En el caso presente, las tomas de presión se construyeron como se detalla a continuación:

Se hicieron los orificios perpendiculares a la pared de los tubos mediante un taladro eléctrico y luego se roscaron para adaptar nipples de 1/4" diámetro externo. Por no encontrar en el comercio, nipples de ese tamaño, se construyeron de una varilla sólida de latón de la cual se cortaron nipples de 2 pulg. a los que posteriormente se les hizo el orificio longitudinal siendo 1/8" su diámetro interno.

Se roscaron en un extremo, sólo lo absolutamente necesario para fijarlos al tubo, evitando en esa forma que sobrepasaran más del espesor de la pared. El otro extremo se hizo en tal forma, que puede adaptarse una conexión de plástico cuyas propiedades se verán posteriormente.

Las diferentes secciones de tubo recto se montaron una a una en forma paralela, aunque con una ligera inclinación para facilitar el drenaje una vez terminados los ensayos. En caso contrario, no todo el agua fluiría, originando corrosión del hierro en los caños.

Debido al carácter provisional del espacio utilizado para la instalación del sistema, se montaron las diferentes secciones en tal forma que con gran facilidad pueden desmontarse y trasladarse a donde sea necesario. En esta forma se evita la necesidad de desmontar totalmente cada sección que consta de muchos accesorios en algunos casos.

No sólo es problemático desmontar pieza por pieza, por el trabajo que esto implica, sino también el riesgo que se corre de dañar válvulas por esfuerzos en su proximidad.

*Instalación de las Placas de Orificio.* Se indicó anteriormente, que por razones prácticas, se utilizó el tipo de tomas de presión llamado "tomas en caño" (pipe taps) que según especificaciones, deben situarse en la forma siguiente:

$2\frac{1}{2}$  diámetros para la toma de presión situada corriente arriba y 8

diámetros para la situada corriente abajo.

Las placas se instalaron entre bridas (flanges) utilizando empaques apropiados para evitar fugas y utilizando pernos para fijar placa y bridas concéntricas al diámetro del tubo.

Las distancias indicadas garantizan en lo posible, la ausencia de perturbaciones en la distribución del flujo. Se ha indicado que las tomas de presión, están situadas a  $2\frac{1}{2}$  diámetros y 8 diámetros arriba y abajo de la placa; pero éstas, a su vez, están situadas 30 y 10 diámetros respectivamente, de los accesorios más próximos.

Construcción de los manómetros. Los tres manómetros fueron contruídos de tubo de vidrio de 8 mm. de diámetro, tamaño que elimina los posibles efectos capilares del fluido.

- a) El manómetro de mercurio para registrar caídas de presión en placas de orificio, tiene una longitud de 39 pulgadas, equivalentes a un metro y una pulgada de ancho. Tiene forma de U y sus dos extremos están unidos a las trampas mediante tubos de hule de gran resistencia.
- b) Manómetro para determinar pérdidas de cabeza en accesorios. También es del tipo mercurio-agua y su longitud actual es de 130 cm. Originalmente tenía la longitud citada para el anterior, pero al operarlo, resultó insuficiente para registrar pérdidas en alguno de los accesorios, siendo necesario por tanto, aumentar su longitud como se ha indicado.
- c) Manómetro aire-agua. En "diseño de los manómetros", se indicó la razón de instalar este manómetro. Su construcción es sencilla, pues consta de dos tubos de vidrio separados en sus extremos que son conextados a sus salidas respectivas.

Su longitud es 39 pulgadas y en su parte superior, tiene

adaptado un bulbo de goma que permite introducir aire a presión cuando es necesario comprimir las columnas de agua o fijar la escala apropiada. También posee una espita que permite la salida del aire si éste, ya no es indispensable.

Los manómetros descritos en (b) y (c) registran las pérdidas de cabeza en accesorios y están instaladas en tal forma que puede usarse simultáneamente o en forma separada, pues están conectadas a los receptores de presión mediante tubo de cobre de 1/4" común a ambos y provistos de espitas que permiten o impiden el flujo según el caso.

Las trampas en los manómetros se construyeron con niples de 6" x 1", con entrada y salida de 1/8" y 1/4" respectivamente. En los extremos de los niples se adaptaron tapones perforados en los cuales están las espitas de purga de aire y agua para cada uno, según el caso. Las trampas se armaron separadamente con todo sus accesorios para la colocación de líneas a los manómetros y al sistema en general.

Construcción de los receptores de presión. Cada uno consta de un niple de 1 1/2" x 2" provistos también de espitas en ambos extremos. En la parte lateral se colocaron espitas en número igual al de terminales procedentes de las tomas de presión.

En todo el sistema hay distribuidos 14 tomas de presión correspondientes a 7 accesorios y 2 secciones de tubo sin accesorios, mediante las cuales se determinan las pérdidas por fricción. Normalmente a cada accesorio corresponden dos tomas de presión. Sin embargo, en el caso presente, hay algunos accesorios que operan con tomas de presión comunes. La diferencia está en que una toma de presión común a dos accesorios funciona como toma de baja presión para uno de ellos y toma de alta presión para el otro y la caída registrada en el manómetro se invierte según el caso.

Para conectar los diferentes tomas de presión con los recepto-

res, se utilizó tubo de cobre de 3/16". En el caso de los medidores de orificio se utilizó tubo de 1/4".

Las uniones entre tubo de cobre y toma de presión, se hicieron mediante tubo de tygon transparente de 3/16" P.I. x 5/16 P.E., cuya resistencia es muy notable. Además permite observar la presencia de aire en algún punto determinado, con lo cual se elimina la posibilidad de errores en las mediciones originadas por la presencia de aire en el sistema.

Para evitar fugas en las diferentes uniones de accesorios a tubos roscados, se utilizó un material conveniente, pero que tiende a endurecer mucho. Por tal motivo en todas aquellas uniones, entre válvulas o espitas, se utilizó teflón, que además de garantizar la eliminación de fugas, permite desmontar el accesorio sin necesidad de gran esfuerzo. Dada la delicada estructura de las válvulas, conviene no ejercer sobre ellas presiones excesivas que ocasionarían desajustes, alterando su perfecto funcionamiento.

Protección de la Bomba contra el Sobrecalentamiento y Sobrecarga.\*

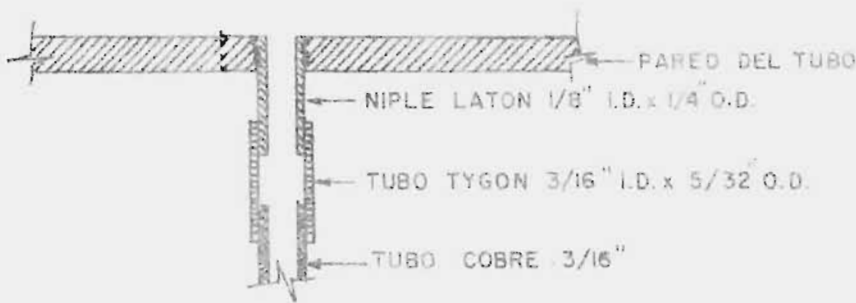
Un método para evitar el deterioro de un motor ocasionado por sobrecalentamiento o sobrevoltaje, es instalar arrancadores magnéticos, justamente después del "SWITCH" o caja donde llega la fuente de corriente.

Si solamente se utilizara un "Switch", no sería posible proteger el motor, porque no opera automáticamente. En cambio, el protector térmico, está construido en tal forma que en el instante que se llega al límite permisible, se desconecta, evitando así, el sobrecalentamiento que conduciría a la destrucción del motor.

-----

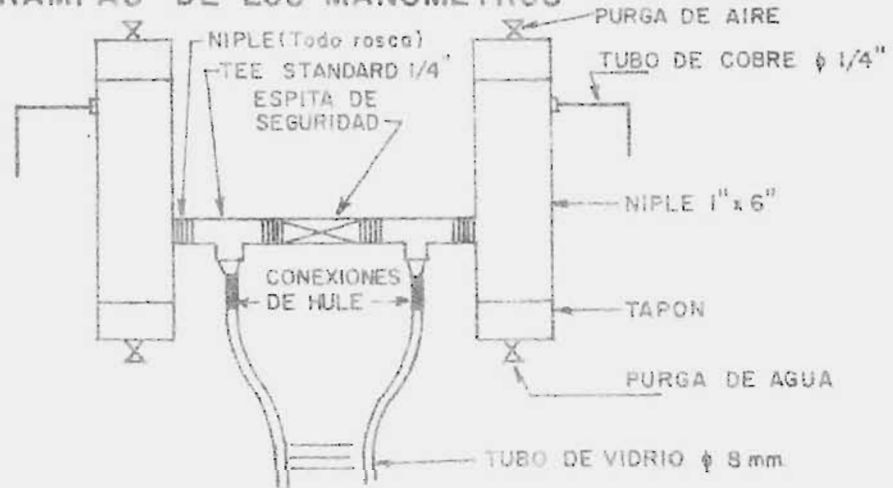
\* Sherman, A.D. y Mendoza, P.S. Comunicaciones personales.

a) TOMAS DE PRESION



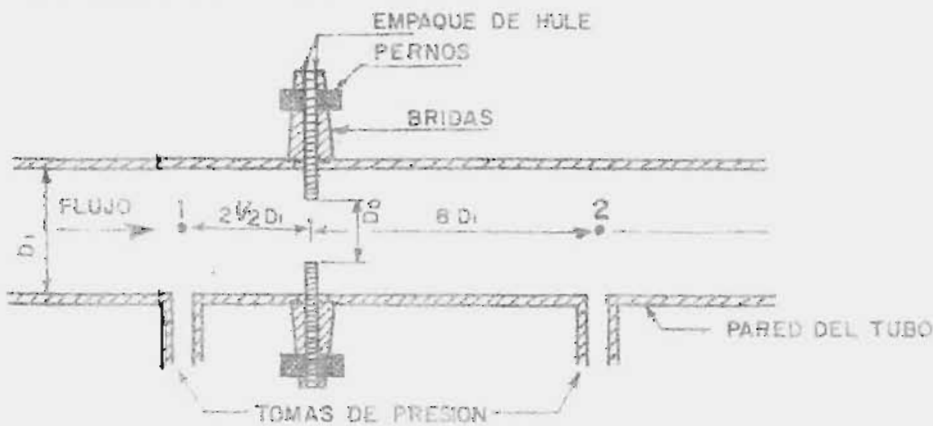
CORTE LONGITUDINAL

b) TRAMPAS DE LOS MANOMETROS



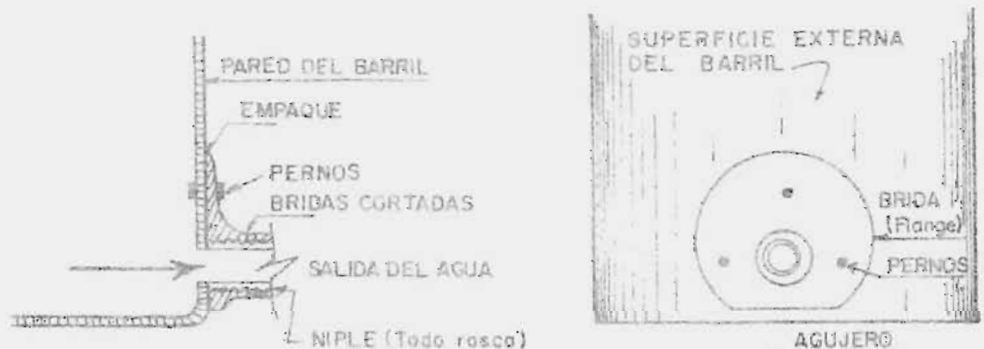
VISTA FRONTAL

c) MEDIDORES DE ORIFICIO



CORTE LONGITUDINAL

d) DESCARGA DEL TANQUE DE MEDICIONES



CORTE LATERAL

VISTA FRONTAL

DETALLES DE CONSTRUCCION

LISTA DE MATERIAL UTILIZADO

<u>CANTIDAD</u>	<u>TIPO</u>	<u>TAMANO, pulg.</u>	<u>MATERIAL DE CONSTRUCCION</u>
3	Válvulas de globo	1. $\frac{1}{2}$ "	bronce
3	Válvulas de compuerta	1. $\frac{1}{2}$ "	bronce
2	Válvulas de cierre <u>rápido</u>	1. $\frac{1}{2}$ "	bronce
1	Válvula de compuerta	1"	bronce
2	Válvulas de compuerta	$\frac{1}{2}$ "	bronce
1	Válvula de compuerta	2"	bronce
2	Bridas (flanges)	1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
2	Bridas	1"	hierro galvanizado
2	Bridas	$\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
37	Espitas	1/8"	latón
45	Pies de tubo de cobre	1/4"	
100	Pies de tubo de cobre	3/16"	
10	Pies de tubo de tygon	3/16"	
18	Niples	2x1/8"	latón
2	Niples	18"x2"	hierro galvanizado
4	Niples	6"x1"	hierro galvanizado
5	Niples todo rosca	2"	hierro galvanizado
14	Niples todo rosca	1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
4	Niples todo rosca	4"x1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
2	Niples todo rosca	6"x1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
1	Unión	2"	hierro galvanizado
7	Uniones	1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
3	Uniones	1/2"	hierro galvanizado
2	Cruces	1. $\frac{1}{2}$ "x1. $\frac{1}{2}$ "x1. $\frac{1}{2}$ "x1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
2	Codos standar 45°	2"	hierro galvanizado
7	Codos Standard 90°	1. $\frac{1}{2}$ "	hierro galvanizado
1	Codo de 90°	1/2"	hierro galvanizado

(Viene Lista Material)

7	Tees standard	$1\frac{1}{2}''$	hierro galvanizado
1	Tee standard	$1/2''$	hierro galvanizado
2	Reductores	$1\frac{1}{2}'' \times 1''$	hierro galvanizado
2	Bushings	$1\frac{1}{2}'' \times 1''$	hierro galvanizado
4	Bushings	$1\frac{1}{2}'' \times 1/2''$	hierro galvanizado
1	Arrancador magnético para el motor de la bomba		
1	Bomba centrífuga		
3	Barriles de 55 gal.		
2	Manómetros líquido-líquido		
1	Manómetro líquido-aire		
2	Placas de orificio		latón
50	Pies de caño de	$1\frac{1}{2}''$	hierro galvanizado
12	Pies de caño de	$1''$	hierro galvanizado
22	Pies de caño de	$1/2''$	hierro galvanizado
1	Cronómetro graduado en décimas de segundo		
	Soportes de madera para sostener caños		
1	Caja switch para la bomba		



## PARTE EXPERIMENTAL

### Consideraciones Generales.

En los párrafos siguientes se citan indicaciones de carácter general, las cuales deben atenderse cuidadosamente en la realización de los experimentos.

- 1.- Comprobar que el tanque de alimentación a la bomba está completamente lleno de agua.
- 2.- Comprobar que la bomba está cebada, para lo cual basta con abrir la espita situada en la descarga de la misma.
- 3.- Las válvulas V-1, V-2 y V-3, deben estar cerradas en el instante de accionar el arrancador magnético.
- 4.- Abrase lentamente la válvula V-1 para permitir el flujo de agua a través de la línea de recirculación.
- 5.- Abrir V-2 y V-3 según sea necesario, aunque es recomendable dejar fluir el agua por todo el sistema para arrastrar el aire hacia los puntos de purga.
- 6.- Abrir las espitas correspondientes para permitir el escape de aire retenido hasta completa eliminación. El aire produce alteraciones en las lecturas de los manómetros, además de representar un peligro de posibles daños en la estructura mecánica de la bomba.
- 7.- Para asegurar completa eliminación del aire también en las trampas y receptores de presión, se han instalado espitas, cuya función es similar a las situadas en las partes altas del sistema.

Para comprobar que todo el aire ha sido eliminado, debe observarse las conexiones de tygon, donde fácilmente puede de-

tectarse la presencia de burbujas de aire. Si este es el caso, repítase la operación de purgado hasta eliminación total del aire.

8. Eliminado completamente el aire, puede proceder a realizar los experimentos planificados, atendiendo las instrucciones específicas en cada caso.

Precauciones que deben observarse en la operación de los manómetros.

Los manómetros deben ser objeto de especial atención durante la operación del sistema, pues su resistencia mecánica es pequeña por ser en su mayor parte de vidrio.

Antes de hacer funcionar el sistema, debe comprobarse que las espitas situadas entre ambas salidas (alta y baja presión) se encuentren abiertas para que ninguna diferencia de presión se registre en las columnas de mercurio. Además de evitar la ruptura por exceso de presión, se evita la posibilidad de tirar el mercurio fuera de las columnas por el mismo efecto.

Conviene mantener abiertas las espitas antes mencionadas, siempre que no sea indispensable su utilización en la medida de una caída de presión.

**NOTA IMPORTANTE:** Las indicaciones dadas anteriormente, deben proceder a cualquier experimento y deben atenderse con el mayor cuidado para evitar posibles daños especialmente en la bomba y manómetros.

## EXPERIMENTOS

### A.- Calibración del medidor de orificio<sup>(b)</sup>

Objeto. Determinar la variación del flujo volumétrico con la caída de presión originada en el medidor de orificio, en tres secciones de tubo con diámetros diferentes.

Procedimiento. Las explicaciones indicadas en "consideraciones generales" deben realizarse cuidadosamente antes de iniciar la anotación de datos experimentales, hasta numeral (8).

a. Cerrar V-3 y abrir V-2 totalmente, cerrando V-1 simultáneamente. El flujo estará en la línea inferior (1.1/2").

b. Cerrar lentamente la espieta del manómetro hasta obtener la máxima deflexión en la columna de mercurio.

c. Anotar la temperatura del agua.

d. Accionar las válvulas situadas justamente sobre el tanque de las mediciones en forma simultánea. También simultáneamente debe hacerse funcionar el cronómetro que registrará el tiempo necesario para llenar el tanque hasta la marca superior del nivel, instante en el cual debe pararse.

e. No es necesario accionar en forma simultánea las válvulas para cortar el flujo al tanque de mediciones y permitir la descarga al tanque de alimentación; basta con abrir la válvula que permite la descarga al tanque de alimentación y luego cerrar la otra, evitando así, una posible equivocación en abrir y cerrar las válvulas.

f. Al mismo tiempo que se está midiendo el volumen debe anotarse la caída de presión registrada en el manómetro.

g) Abrir la válvula de descarga del tanque de mediciones

hasta casi eliminación del agua del mismo.

h. Mediante V-1 se cambia el flujo en esta primera etapa del experimento. La válvula puede abrirse en tal forma que puedan obtenerse cambios regulares en la caída de presión si así se desea.

i. Cuando V-1 ha sido completamente abierta, el flujo se controlará mediante V-2 que deberá cerrarse gradualmente, hasta la mínima caída de presión que pueda registrarse en el manómetro.

j. En cada corrida se anotará lo siguiente: volumen (constante), tiempo y caídas de presión.

k. Repetir el procedimiento en forma inversa, es decir, de flujo mínimo a flujo máximo para comparación de resultados.

#### Continuación de los Ensayos.

Para cambiar el flujo a la segunda línea (1") deberá cerrarse la válvula V-2 a la vez que se abre V-3; V-5 también permanece cerrada, así que sólo se tendrá flujo en la línea de 1".

Durante las operaciones de cambio, la espita del manómetro debe estar abierta para prevenir cualquier golpe brusco de la presión que origina un cambio brusco también en la columna. Para la sección 3a. (1/2") también debe procederse igual que en los casos anteriores; esta vez, cerrando V-4 y abriendo V-5.

#### Observaciones.

Todas las corridas se efectúan a volumen constante debido a que resulta más fácil que fijar el tiempo, dada la imposibilidad de medir exactamente el volumen colectado porque el tanque tiene algunas irregularidades que darían error si se consideraran sólo las medidas de diámetro y altura del mismo.

Antes de encontrar la forma final de medir el volumen se en-

sayaron varios métodos, decidiendo en último caso por el método descrito. A continuación se da una breve explicación del procedimiento que se utilizó para medir un volumen constante.

En primer lugar, se hizo una marca en el tubo de vidrio, que sirve para indicar el nivel del agua en el tanque en cualquier instante. Se midió a partir de la marca, el volumen de agua por medio de una probeta graduada (2 litros) hasta dejar un residuo que es el mismo dejado en cada medición. Esto es porque al abrir la válvula de descarga del tanque, se midió lo que era permisible salir sin inclinar el tanque.

La manipulación simultánea de las dos válvulas de cierre rápido en forma conveniente, también fue el resultado de una serie de pruebas todas conducentes a encontrar un método seguro, exacto y fácilmente operado por una sola persona.

Próximamente se substituirá el método de medir un volumen constante por el de peso constante, pues se contará en breve con una báscula sobre la cual se colocará el tanque de mediciones.

Concluidos los ensayos debe procederse a drenar el sistema para remover el agua retenida en las líneas y en los receptores, así como en las trampas de los manómetros. Para ello basta con abrir todas las válvulas y espitas del sistema, permitiendo así que el agua residual fluya por gravedad hacia el tanque de alimentación que a su vez deberá drenarse.

#### Cálculos:

En tablas I, II, III y IV se han tabulado los datos experimentales para las tres secciones de tubo (1.1/2, 1" y 1/2"). Por razones de espacio se han incluido en las mismas tablas los cálculos de velocidad, número de Reynolds y flujo volumétrico.

Datos utilizados:

Densidad del agua a 30°C = 62.17 lbm/pie<sup>3</sup>; diámetro interno del tubo de 1/2" = 0.622"

Viscosidad del agua a 30°C = 0.815 cp.

Volumen medido en cada corrida = 5.20 pies<sup>3</sup>

Diámetro interno del tubo de 1.1/2" = 1.61 pulg.

Area seccional interna tubo de 1.1/2" = 0.01414 pies<sup>2</sup>

Diámetro interno del tubo de 1" = 1.049 pulg.

Area seccional interna tubo de 1" = 0.006 pies<sup>2</sup>

NOTA: Al final de las tablas aparece 0.778 pies<sup>3</sup> como el volumen medid en esa parte de los ensayos. Esto es así, porque sólo se midió el volumen comprendido entre dos marcas y que fue determinado en la misma forma como el dato 5.20 pies<sup>3</sup>.

El sistema en su mayor parte puede ser operado, aunque con un poco de trabajo, por una sola persona. Solamente a flujos grandes es necesaria la ayuda de otra, pues la rápida velocidad de llenado no permite controlar todo sin dificultad.

Los datos de las tablas I, II y III son representados gráficamente en las figuras 6 y 7 donde se puede ver las variaciones del flujo volumétrico y velocidad con la caída de presión a través del medidor de orificio.

La figura 6 representa el flujo volumétrico en las tres secciones de tubo y la caída de presión en el medidor de orificio. Nótese los símbolos utilizados para diferenciar unos puntos de otros.

En la figura 8 se presentan los datos de velocidad vs  $\Delta h$ , pulg Hg para los tubos de 1" y 1/2" respectivamente, los cuales

han sido calculados mediante la ecuación de continuidad. Como referencia se utilizaron los datos de velocidad del tubo de 1.1/2".

Pérdidas de Presión por Fricción en tubos y Accesorios. (d, 3, 5, 7, 11, 13)

La determinación de las pérdidas de presión por fricción originadas en el flujo de un fluido en tubos y accesorios, es fundamental en el diseño de cualquier sistema de flujo; pues sólo conociendo su magnitud puede seleccionarse el tamaño de bomba para compensar esas pérdidas. En los párrafos siguientes se indica el procedimiento que se ha seguido para la determinación de pérdidas de presión por fricción en accesorios y secciones de tubo recto.

*Objeto.*

Determinar pérdidas de presión por fricción a diferentes velocidades de flujo en: válvula de globo, acoplamiento, flange, expansión, reducción, válvula de compuerta 1/2", sección de tubo recto de 1/2" y sección de tubo de recto de 1.1/2".

*Procedimiento.*

- a) Medir la distancia entre tomas de presión.
- b) Hacer pasar el fluido a través de la parte del sistema que contiene los accesorios en consideración.
- c) La determinación de las pérdidas en los accesorios se efectúa independientemente para cada uno. Por tanto, antes de proceder a las mediciones deben cerrarse todas las espitas de las diferentes tomas de presión excepto las dos correspondientes al accesorio en cuestión (ver fig. 3).
- d) La velocidad de flujo se controla mediante V-1, V-2, ó V-3 según sea el caso considerado.
- e) Para la determinación de las pérdidas en los accesorios se han instalado dos manómetros, uno de los cuales se



utiliza para medir caídas de presión de magnitud apreciable; mientras que el otro sólo se utiliza para medir caídas de presión pequeñas con mayor exactitud que si se determinaran con el manómetro de mercurio.

- f) Para determinar la velocidad lineal de flujo que corresponde a cada una de las pérdidas registradas, se utilizan las curvas de calibración del medidor de orificio previamente construidas (ver fgs. 6, 7 y 8).
- g) Graficar para cada accesorio en papel log-log pérdidas de cabeza vs. velocidad.
- h) Calcular de los datos experimentales para tubo recto 1.1/2" y 1/2" los factores de fricción de Fanning y compararlos con los reportados en la literatura.<sup>(8)</sup>
- i) Calcular el error experimental en "F" factor de fricción y Re tomando en consideración las cantidades sujetas a error en las mediciones experimentales tales como tiempo, volumen, diámetro real del tubo utilizado.
- j) Calcular las pérdidas de presión por fricción en tubos y accesorios utilizando las ecuaciones teóricas conocidas.<sup>(9,11,13,15)</sup> Comparar los valores calculados en esta forma y los determinados experimentalmente.

#### Cálculos:

En tablas V y VI están tabulados los valores experimentales y los calculados de tales datos.

En las figuras 9, 10, 11, 12 y 13 están graficados los valores tabulados en V y VI.

En la figura 10 se han graficado las pérdidas de cabeza para tubo recto de 1.1/2" y acomplamiento, ambos del mismo diámetro.

Los datos para tubo 1.1/2" se han tomado de la tabla VI y para acoplamiento de la tabla V.

La figura 9 representa las pérdidas para válvulas de globo de 1.1/2" y tubo de 1/2".

La figura 11 representa las pérdidas en accesorios de 1", siendo ellos: bridas (flanges), expansión y reducción. En la figura 12 se representan las pérdidas para la válvula de 1/2".

Por razones de espacio, se han incluido en la mayoría de los casos, dos tipos de accesorios en una misma figura.

T A B L A I

TABULACION DE RESULTADOS PARA LA CALIBRACION DEL MEDIDOR DE  
ORIFICIO INSTALADO EN LA LINEA DE 1.1/2".

Temperatura promedio del  
agua

: 30°C

Diámetro interno del tubo: 1.61 pulg.  $Re = \frac{1.61 \times 62.17 \times u}{12 \times 0.815 \times 6.72 \times 10^{-4}} = 1.53 \times 10^4 u$

Area seccional interna : 0.01414 pies<sup>2</sup>

Densidad del agua a 30°C : 62.17 lbs/pie<sup>3</sup>

Viscosidad agua a 30°C : 0.815 cp

Volumen medido en cada  
corrida

: 5.20 pies<sup>3</sup>

CORRIDA	TIEMPO, seg.	$\Delta h$ , pulg. Hg.	$Q$ , pies <sup>3</sup> /seg	$u$ , pies/seg	No. de Re
1	19.4	30	0.2680	18.90	2.93x10 <sup>5</sup>
2	20.0	28	0.2600	18.40	2.85 "
3	20.7	26	0.2520	17.75	2.75 "
4	21.7	24	0.2400	16.90	2.63 "
5	22.0	22	0.2360	16.75	2.59 "
6	23.50	20	0.2210	15.60	2.42 "
7	25.1	18	0.2070	14.65	2.27 "
8	26.7	16	0.1950	13.75	2.13 "
→9	28.2	14.5	0.1850	13.10	2.00 "
10	30.1	13.0	0.1730	12.20	1.89 "
11	31.2	12.	0.1670	11.80	1.83 "
12	33.1	11	0.1570	11.05	1.71 "
13	34.6	10	0.1500	10.60	1.64 "
14	36.5	9	0.1430	10.00	1.55 "
15	38.4	8	0.1350	9.55	1.48 "
16	41.5	7	0.1250	8.85	1.37 "
17	44.6	6	0.1170	8.25	1.28 "
18	49.4	5	0.1050	7.42	1.15 "
19	55.3	4	0.0940	6.62	1.03 "
20	65.0	3	0.0825	5.82	9.00x10 <sup>4</sup>
21	76.5	2	0.0680	4.80	7.45 "
22	109.8	1	0.0475	3.35	5.20 "

Volumen medido en cada corrida = 0.778 pies<sup>3</sup>

23	18.5	0.875	0.0420	2.96	4.60x10 <sup>4</sup>
24	19.5	0.750	0.0399	2.82	4.36 "
25	23.0	0.500	0.0338	2.38	3.70 "
26	29.4	0.250	0.0264	1.86	2.90 "

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos cuando las mediciones se hicieron de flujo mínimo a máximo, en las mismas condiciones de temperatura y volumen.

CORRIDA	TIEMPO, seg.	$\Delta h$ , pulg. Hg.	$Q$ , pies <sup>3</sup> /seg	$u$ , pies/seg	No. de Re
1	90.3	1.37	0.0575	4.06	6.21x10 <sup>4</sup>
2	62.4	3.00	0.0830	5.88	9.10 "
3	48.4	5.00	0.1075	7.58	1.18x10 <sup>5</sup>
4	41.1	7.00	0.1260	8.95	1.39 "
5	36.1	9.00	0.1440	10.15	1.57 "
6	33.0	11.0	0.1570	11.10	1.72 "
7	29.5	13.0	0.1760	12.40	1.930 "
8	27.8	15.0	0.1870	13.20	2.04 "
9	25.7	17.0	0.2020	14.30	2.22 "
10	23.9	19.0	0.2170	15.35	2.38 "
11	23.0	21.0	0.2260	16.00	2.48 "
12	22.0	23.0	0.2360	16.70	2.58 "
13	20.7	25.0	0.2510	17.70	2.75 "
14	19.8	27.0	0.2630	18.60	2.87 "
15	19.2	29.0	0.2710	19.10	2.95 "

T A B L A II

TABULACION DE RESULTADOS PARA LA CALIBRACION DEL MEDIDOR  
DE ORIFICIO EN LA LINEA DE 1.1/2".

Temperatura promedio del agua : 30°C  
 Diámetro interno del tubo : 1.049";  $Re = \frac{1.049 \times 62.17 \times u}{12 \times 0.815 \times 6.72 \times 10^{-4}} = 1 \times 10^4 u$   
 Area seccional interna : 0.006 pies<sup>2</sup>  
 Densidad del agua a 30°C : 62.17 lbs/pie<sup>3</sup>  
 Viscosidad del agua a 30°C: 0.815 cp  
 Volumen medido en cada corrida : 5.20 pies<sup>3</sup>

CORRIDA	TIEMPO, seg.	$\Delta h$ , pulg. Hg.	$Q$ , pies <sup>3</sup> /seg	$u$ , pies/seg	No. de Re
1	25.9	18	0.2000	33.4	3.34x10 <sup>5</sup>
2	26.1	17	0.1980	33.2	3.32 "
3	26.6	16	0.1950	32.5	3.25 "
4	27.8	15	0.1870	32.1	3.11 "
5	28.7	14	0.1810	30.1	3.01 "
6	29.7	13	0.1750	29.2	2.92 "
7	31.6	12	0.1640	27.4	2.74 "
8	32.2	11	0.1620	27.0	2.70 "
9	34.2	10	0.1520	25.4	2.54 "
10	37.2	9	0.1400	23.4	2.34 "
11	39.3	8	0.1320	22.0	2.20 "
12	41.2	7	0.1260	21.0	2.10 "
13	44.4	6	0.1170	19.5	1.95 "
14	48.7	5	0.1070	17.8	1.78 "
15	55.7	4	0.0935	15.7	1.57 "
16	64.8	3	0.0802	13.4	1.34 "
17	78.5	2	0.0662	11.0	1.10 "

Volumen medido = 0.778 pies<sup>3</sup>

18	12.8	1.875	0.0604	10.2	$1.02 \times 10^5$
19	13.8	1.58	0.0562	9.4	$9.40 \times 10^4$
20	15.0	1.38	0.0519	8.65	8.65 "
21	17.1	1.13	0.0482	8.02	8.02 "
22	19.8	0.75	0.0392	6.52	6.52 "
23	22.6	0.50	0.0344	5.72	5.72 "
24	29.4	0.25	0.0264	4.40	4.40 "

Para propósito de comparación, a continuación se insertan los valores obtenidos cuando el flujo aumenta progresivamente de mínimo a máximo en la línea de 1". Condiciones de operación iguales a las anteriores.

CORRIDA	TIEMPO, seg.	$\Delta h$ , pulg Hg.	$Q$ , pies <sup>3</sup> /seg	$u$ , pies/seg	No. de Re
1	66.4	3.0	0.0782	13.1	$1.31 \times 10^5$
2	49.4	5.0	0.1050	17.5	1.75 "
3	41.6	7.0	0.1250	20.8	2.08 "
4	37.5	9.0	0.1385	23.1	2.31 "
5	33.1	11.0	0.1574	26.2	2.62 "
6	29.6	13.0	0.1755	29.3	2.93 "
7	29.2	14.0	0.1785	29.9	2.99 "
8	27.8	15.0	0.1870	31.4	3.14 "
9	26.6	16.0	0.1950	32.5	3.25 "
10	26.0	17.0	0.2000	33.4	3.34 "
11	25.3	18.0	0.2050	34.2	3.42 "



Determinación de las curvas de calibración teóricas para los tubos de 1" y 1/2", utilizando la ecuación de continuidad.

Base: Datos experimentales para tubo de 1.1/2" (Tabla I)

Area seccional interna del tubo de 1" = 0.006 pies<sup>2</sup>

Area seccional interna del tubo de 1/2" = 0.00211 pies<sup>2</sup>

T A B L A IV

$\Delta h, \text{pulg Hg}$ (orificio)	$Q, \text{pies}^3/\text{seg}$	$u, \text{pies}/\text{seg}$ <sub>1 1/2"</sub>	$u, \text{pies}/\text{seg}$ <sub>1"</sub>	$u, \text{pies}/\text{seg}$ <sub>1/2"</sub>
30.00	0.2680	18.90	44.7	127.0
28.00	0.2600	18.40	43.4	123.0
26.00	0.2520	17.75	42.0	149.9
24.00	0.2400	16.90	40.0	114.0
22.00	0.2360	16.75	39.5	112.0
20.00	0.2210	15.60	36.8	104.5
18.00	0.2070	14.65	34.4	98.1
16.00	0.1950	13.75	32.5	93.5
→14.50	0.1850	13.10	30.75	87.8
13.00	0.1730	12.20	28.80	82.0
12.00	0.1670	11.80	27.80	79.0
11.00	0.1570	11.05	26.20	74.4
10.00	0.1500	10.60	25.00	71.0
9.00	0.1430	10.00	23.80	68.0
8.00	0.1350	9.55	22.50	64.0
7.00	0.1250	8.85	20.80	59.2
6.00	0.1170	8.25	19.50	55.5
5.00	0.1050	7.42	17.50	50.0
4.00	0.0940	6.62	15.65	49.5
3.00	0.0825	5.82	13.75	39.00
2.00	0.0680	4.80	11.35	32.4
1.00	0.0475	3.35	7.92	22.6
0.88	0.0420	2.96	7.00	19.9
0.75	0.0399	2.82	6.64	18.8
0.50	0.0338	2.38	5.62	16.0
0.25	0.0264	1.86	4.40	12.0



T A B L A V

PERDIDAS DE PRESION POR FRICCIÓN EN TUBOS Y ACCESORIOS

*Tabulación de Resultados Experimentales y Calculados.*

1) *Válvula de globo de 1.1/2" + 60 pulg. de tubo recto de 1.1/2"*

<u>LECTURA MANOMETRO ORIFICIO</u>			<u>LECT. MANOMETRO ACCESOR.</u>			<u>PERDIDAS</u>	<u>VELOCIDAD</u>
<u>Izq.</u>	<u>Derecha</u>	<u><math>\Delta h</math>, pulg Hg</u>	<u>Izq.</u>	<u>Derecha</u>	<u><math>\Delta h</math>, cm Hg</u>	<u>H, pies de H<sub>2</sub>O</u>	<u>u, pies/seg</u>
6.25	32.75	26.50	106.5	24.3	82.2	34.9	18.00
6.75	32.25	25.50	105.2	25.7	79.5	32.8	17.25
7.00	32.00	25.00	104.0	26.5	77.5	32.0	17.00
7.50	31.50	24.00	102.7	28.0	74.7	30.8	16.90
8.00	31.00	23.00	100.0	29.2	70.8	29.2	16.80
8.50	30.50	22.00	99.5	31.0	68.5	28.3	16.75
9.00	30.00	21.00	98.5	32.2	66.3	27.4	16.00
9.50	29.50	20.00	96.5	33.2	62.3	25.8	15.60
10.00	29.00	19.00	95.0	35.0	60.0	24.7	15.35
10.50	28.50	18.00	94.7	37.0	57.7	23.8	14.65
11.00	28.00	17.00	91.8	39.0	52.8	21.7	14.30
11.50	27.50	16.00	91.5	40.4	51.1	21.0	13.75
12.00	27.00	15.00	89.3	41.5	47.8	19.8	13.20
12.25	26.75	14.50	87.8	42.7	45.0	18.6	13.10

2) *Acoplamiento 1.1/2" + 60 pulg. de tubo recto de 1.1/2"*

5.25	34.00	28.75	60.8	69.6	8.8	3.65	18.75
6.00	33.25	27.25	60.9	69.5	8.6	3.57	18.20
6.50	32.75	26.25	61.0	69.4	8.4	3.48	18.00
7.00	32.25	25.25	61.1	69.3	8.2	3.40	17.80
8.00	31.25	23.25	61.4	69.0	7.6	3.16	16.80
8.50	30.75	22.25	61.6	68.8	7.2	2.98	16.75
9.50	29.75	20.25	62.0	68.4	6.4	2.65	15.65
10.50	28.75	19.25	62.2	68.2	6.0	2.44	15.35

11.00	28.25	17.25	62.4	68.0	5.6	2.32	14.30
12.00	27.25	15.25	62.8	67.6	4.8	1.99	13.40
12.50	26.75	14.25	63.0	67.4	4.4	1.82	12.80
13.50	25.75	12.25	63.4	67.0	3.6	1.49	11.90
14.50	24.50	10.00	63.8	66.6	2.8	1.16	10.60
15.50	23.50	8.00	64.0	66.4	2.4	1.00	9.55

*Lecturas leídas en el manómetro aire-agua pulg H<sub>2</sub>O*

16.50	22.50	6.00	17.75	27.50	10.25	0.855	8.25
17.00	22.00	5.00	16.75	24.25	7.50	0.625	7.42
17.50	21.50	4.00	16.90	22.25	5.35	0.445	6.62
18.00	21.00	3.00	15.25	19.75	4.50	0.375	5.82

3) *Flange 1" + 37.50 pulg. de tubo recto de 1"*

10.5	28.5	18.00	81.9	48.5	33.4	13.85	33.4
11.5	27.4	16.00	80.0	50.0	30.0	12.45	32.5
11.88	27.13	15.25	79.5	51.0	28.5	11.85	31.5
12.14	26.88	14.75	79.0	51.4	27.6	11.45	31.0
12.50	26.50	14.00	78.5	52.0	26.5	11.00	30.1
13.00	26.00	13.00	77.4	52.9	24.5	10.20	29.2
13.50	25.50	12.00	76.5	53.7	22.8	9.50	27.4
14.00	25.00	11.00	75.7	54.6	21.1	8.75	27.0
14.50	21.50	10.00	74.7	55.6	19.1	7.95	25.4
15.00	24.00	9.00	73.5	56.3	17.2	7.15	23.4
15.50	23.50	8.00	73.0	57.3	16.7	6.96	22.0
16.00	23.00	7.00	72.0	58.3	13.7	5.70	21.0
16.50	22.50	6.00	71.2	59.0	12.2	5.08	19.5
17.00	22.00	5.00	70.0	60.3	9.7	4.05	17.8
17.50	21.50	4.00	69.0	61.3	7.7	3.20	15.7
18.00	21.00	3.00	68.0	62.2	5.8	2.42	13.4
18.50	20.50	2.00	67.0	63.0	3.0	1.24	11.0
19.00	20.00	1.00	66.0	64.1	1.9	0.80	8.0

4) Expansión 1"x1.1/2"+5.6 pulg. tubo 1" + 50 pulg. tubo 1.1/2"

10.50	28.50	18.00	75.0	55.5	20.0	8.30	33.50
11.50	27.50	16.00	74.3	55.8	18.5	7.62	32.60
11.75	27.25	15.50	74.0	56.3	17.7	7.30	32.30
12.00	27.00	15.00	73.6	56.5	17.1	7.03	32.00
12.50	26.50	14.00	73.2	57.0	16.20	6.70	30.10
13.00	26.00	13.00	72.5	57.7	14.8	6.10	29.25
13.50	25.50	12.00	72.0	58.4	13.6	5.60	27.50
14.00	25.00	11.00	71.5	59.0	12.5	5.15	27.00
14.50	24.50	10.00	70.8	59.6	11.2	4.62	25.40
15.00	24.00	9.00	70.2	60.0	10.2	4.20	23.50
15.50	23.50	8.00	69.5	60.7	8.8	3.64	22.00
16.00	23.00	7.00	69.1	61.1	8.0	3.30	21.00
16.50	22.50	6.00	68.3	61.9	6.4	2.64	19.50
17.00	22.00	5.00	67.8	62.4	5.4	2.24	17.80
17.50	21.50	4.00	67.2	63.0	4.2	1.63	15.75
18.00	21.00	3.00	66.7	63.5	3.2	1.32	13.45
18.50	20.50	2.00	66.1	64.2	1.9	.78	11.00

5) Reducción 1.1/2" x 1" + 8.75 pulg. tubo 1.1/2" + 41 pulg. tubo 1"

10.75	28.25	17.50	98.5	32.0	66.5	27.50	33.20
11.50	27.50	16.00	95.0	35.5	59.5	24.60	32.50
12.00	27.00	15.00	93.5	37.0	56.5	23.40	32.10
12.50	26.50	14.00	92.0	39.2	52.8	21.80	30.00
13.00	26.00	13.00	90.0	40.7	44.8	20.40	29.25
13.50	25.50	12.00	87.8	43.0	44.3	18.50	27.50
14.00	25.00	11.00	86.3	44.6	41.7	17.20	27.00
14.50	24.50	10.00	84.5	46.0	38.5	15.90	25.4
15.00	24.00	9.00	82.4	48.0	34.4	14.20	23.4
15.50	23.50	8.00	80.5	50.1	30.4	12.80	22.0
16.00	23.00	7.00	78.4	52.2	26.2	10.90	21.0
16.50	22.50	6.00	77.5	53.4	24.1	9.95	19.5

17.00	22.00	5.00	74.0	55.9	18.2	7.50	17.8
17.50	21.50	4.00	72.5	57.6	14.9	6.15	15.7
18.00	21.00	3.00	70.3	59.7	10.6	4.35	13.4
18.50	20.50	2.00	68.3	61.5	6.8	2.80	11.00
19.00	20.00	1.00	66.8	63.2	3.6	1.50	7.40
19.25	19.75	0.50	66.0	64.0	2.0	0.83	5.72

6) *Válvula de compuerta 1/2" + 23.5 pulg. tubo 1/2"; velocidad en tubo 1/2"*

19.25	19.50	0.25	63.0	67.0	4.0	1.66	11.75
19.13	19.68	0.55	60.5	69.5	9.0	3.74	16.50
19.00	19.75	0.75	59.0	71.0	12.0	4.95	19.30
18.88	19.88	1.00	51.0	79.0	28.0	11.60	22.90
18.75	20.00	1.25	44.0	86.0	42.0	17.45	24.00
18.67	20.13	1.46	41.5	88.5	47.0	19.50	25.00

7) *11 pies de tubo recto de 1/2" sin accesorio*

19.25	19.50	0.25	81.5	55.0	26.5	11.00	11.75
19.13	19.68	0.55	90.0	40.0	50.0	20.75	16.50
19.00	19.75	0.75	104.5	25.8	78.7	32.6	19.30
18.88	19.88	1.00	113.0	17.5	95.5	39.5	22.90
18.75	20.00	1.25	122.0	8.5	113.5	47.0	24.0
18.68	20.13	1.45	127.5	3.0	124.5	52.0	25.00

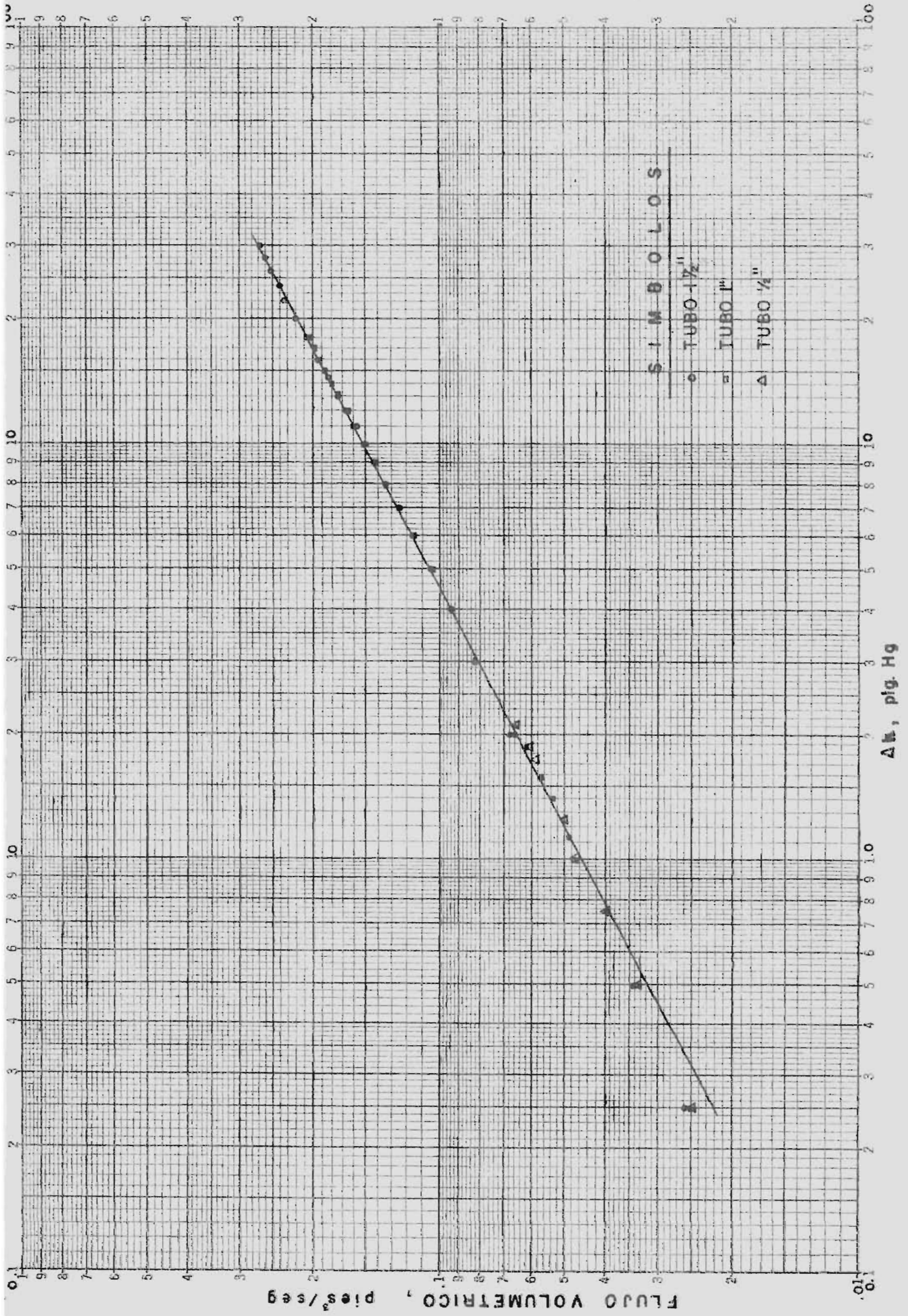
T A B L A VI

Factores de Fricción, L = 8 pulg.; D. I. = 1.61 pulg.

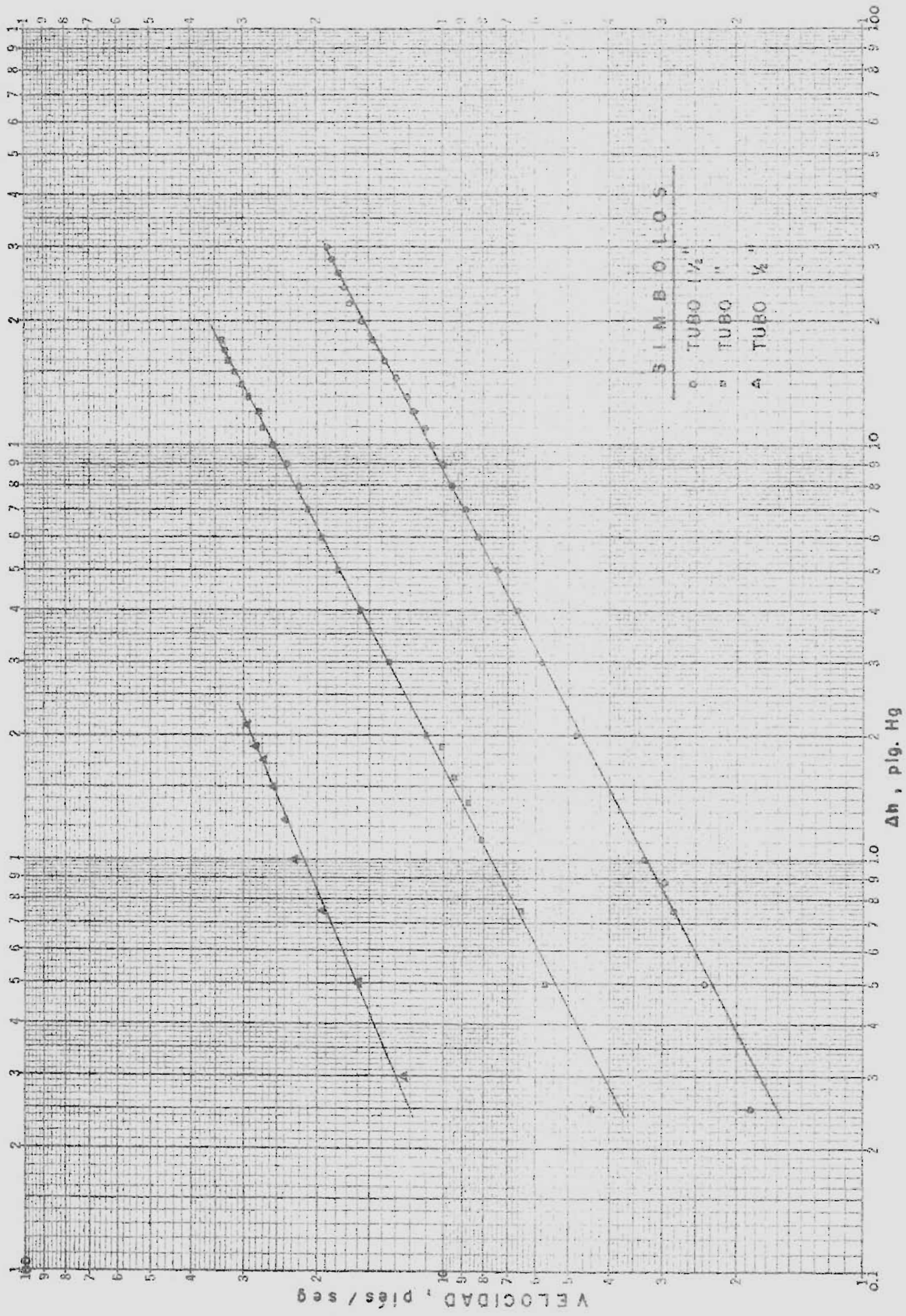
TABULACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CALCULADOS.

LECTURA MANOMETRO ORIFICIO				LECTURA MANOMETRO ACCESORIO				VELOCIDAD u, pies/seg.	Factor de fricción <sup>"f"</sup>	NUMERO DE REYNOLDS
Rama Izquierda	Rama Derecha	$\Delta h$ , pulg Hg	Rama Izquierda	Rama Derecha	$\Delta h$ , cm Hg	H, pies H <sub>2</sub> O (Head Loss)				
4.0	33.50	29.50	74.6	64.8	9.2	4.18	18.60	0.00365	2,920 x 10 <sup>5</sup>	
5.0	32.50	27.50	73.8	65.0	8.8	3.65	18.25	0.00369	"	
5.50	32.00	26.50	73.7	65.1	8.6	3.56	17.75	0.00370	"	
6.00	31.50	25.50	73.6	65.2	8.4	3.49	17.40	0.00372	"	
6.50	31.00	24.50	73.5	65.3	8.2	3.40	17.00	0.00377	"	
7.00	30.50	23.50	73.4	65.4	8.0	3.32	16.80	0.00380	"	
7.50	30.00	22.50	73.3	65.5	7.8	3.25	16.50	0.00382	"	
8.00	29.50	21.50	73.2	65.6	7.6	3.16	16.20	0.00387	"	
8.50	29.00	20.50	73.0	65.8	7.2	2.98	15.75	0.00388	"	
9.00	28.50	19.50	72.8	66.0	6.8	2.72	15.25	0.00391	"	
9.50	28.00	18.50	72.6	66.2	6.4	2.66	14.80	0.00393	"	
10.00	27.50	17.50	72.4	66.4	6.0	2.48	14.30	0.00394	2.22	
10.50	27.00	16.50	72.2	66.6	5.6	2.32	13.80	0.00395	2.150	
11.00	26.50	15.50	72.1	66.7	5.4	2.24	13.50	0.00396	2.100	

+11.50	26.00	14.50	71.9	66.9	5.0	2.07	13.10	0.00402	2.000 x 10 <sup>5</sup>
12.00	25.50	13.50	71.8	67.0	4.8	1.99	12.60	0.00405	1.955 "
12.50	25.00	12.50	71.6	67.2	4.4	1.82	12.00	0.00408	1.860 "
13.00	24.50	11.50	71.4	67.4	4.0	1.66	11.40	0.00414	1.765 "
13.50	24.00	10.50	71.3	67.5	3.8	1.56	11.00	0.00419	1.705 "
14.00	23.25	9.25	71.1	67.7	3.4	1.41	10.30	0.00428	1.600 "
14.50	22.75	8.25	70.9	67.9	3.0	1.25	9.75	0.00425	1.520 "
15.00	22.25	7.25	70.8	68.0	2.8	1.16	9.30	0.00435	1.410 "
15.50	21.75	6.25	70.6	68.2	2.4	0.98	8.40	0.00458	1.300 "
16.00	21.25	5.25	70.4	68.4	2.0	0.83	7.60	0.00464	1.180x "
16.50	20.75	4.25	70.2	68.6	1.6	0.665	6.75	0.00472	1.050 "
17.00	20.25	3.25	70.1	68.7	1.4	0.582	6.10	0.00505	9.45 x 10 <sup>4</sup>
17.50	19.75	2.25	69.9	68.9	1.0	0.415	5.00	0.00532	7.75 "
17.75	19.50	1.75	69.8	69.0	0.8	0.332	4.40	0.00550	6.82 "
18.00	19.25	1.25	69.7	69.1	0.6	0.248	3.70	0.00565	5.72 "
18.25	19.00	0.75	69.6	69.2	0.4	0.166	2.83	0.00672	4.35 "

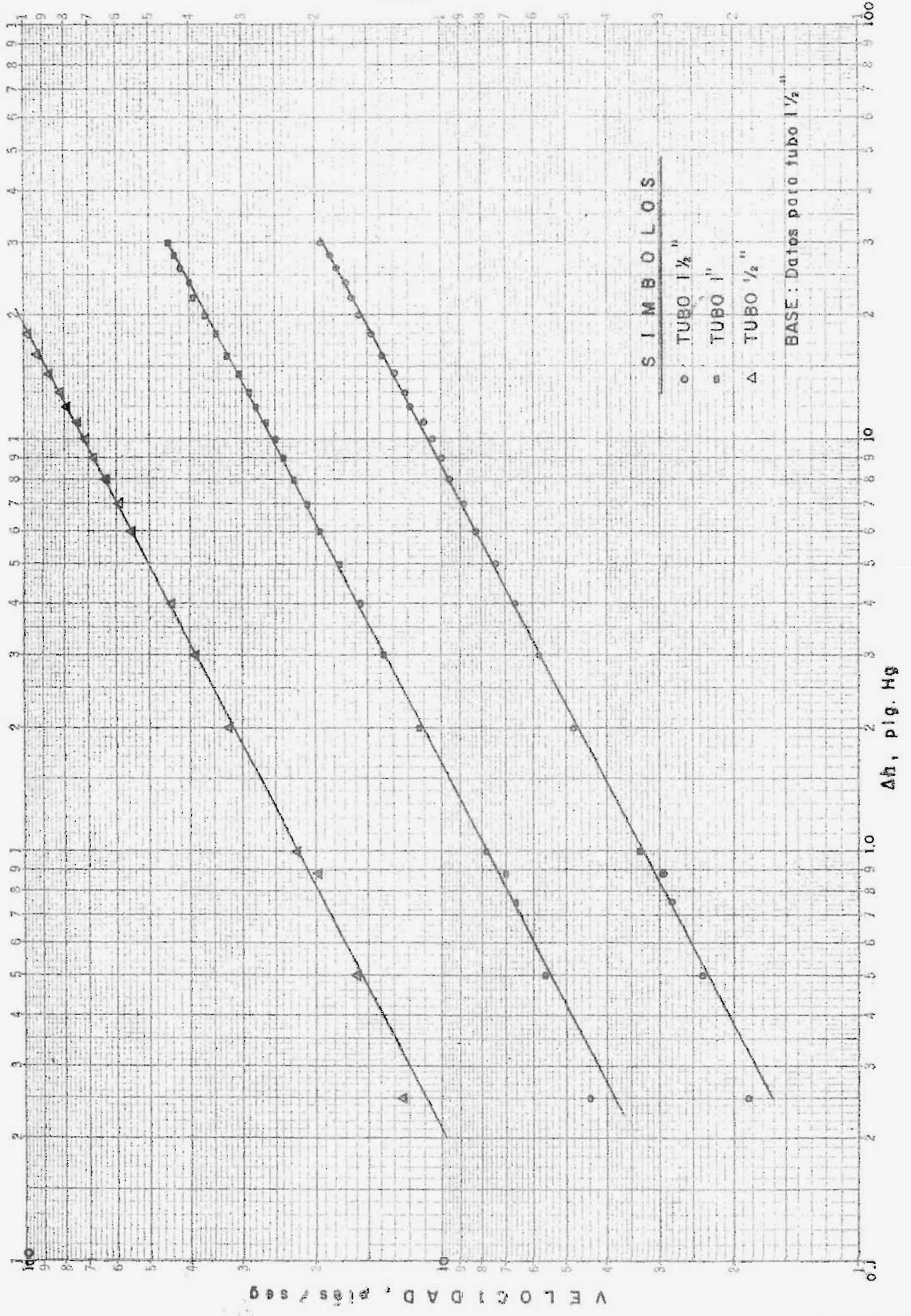


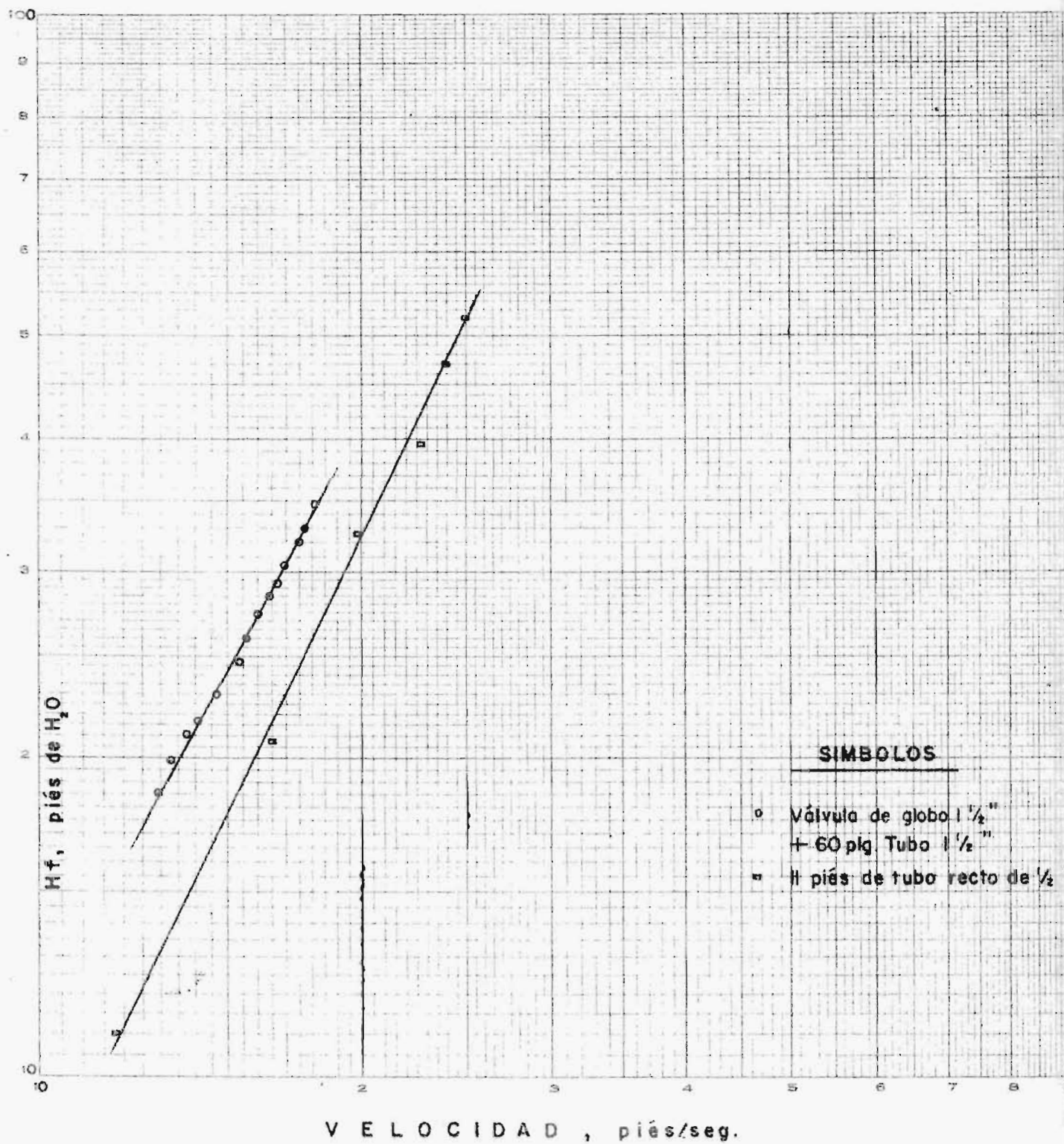
CURVAS DE CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO F. J. MEJIA FIG. No. 6

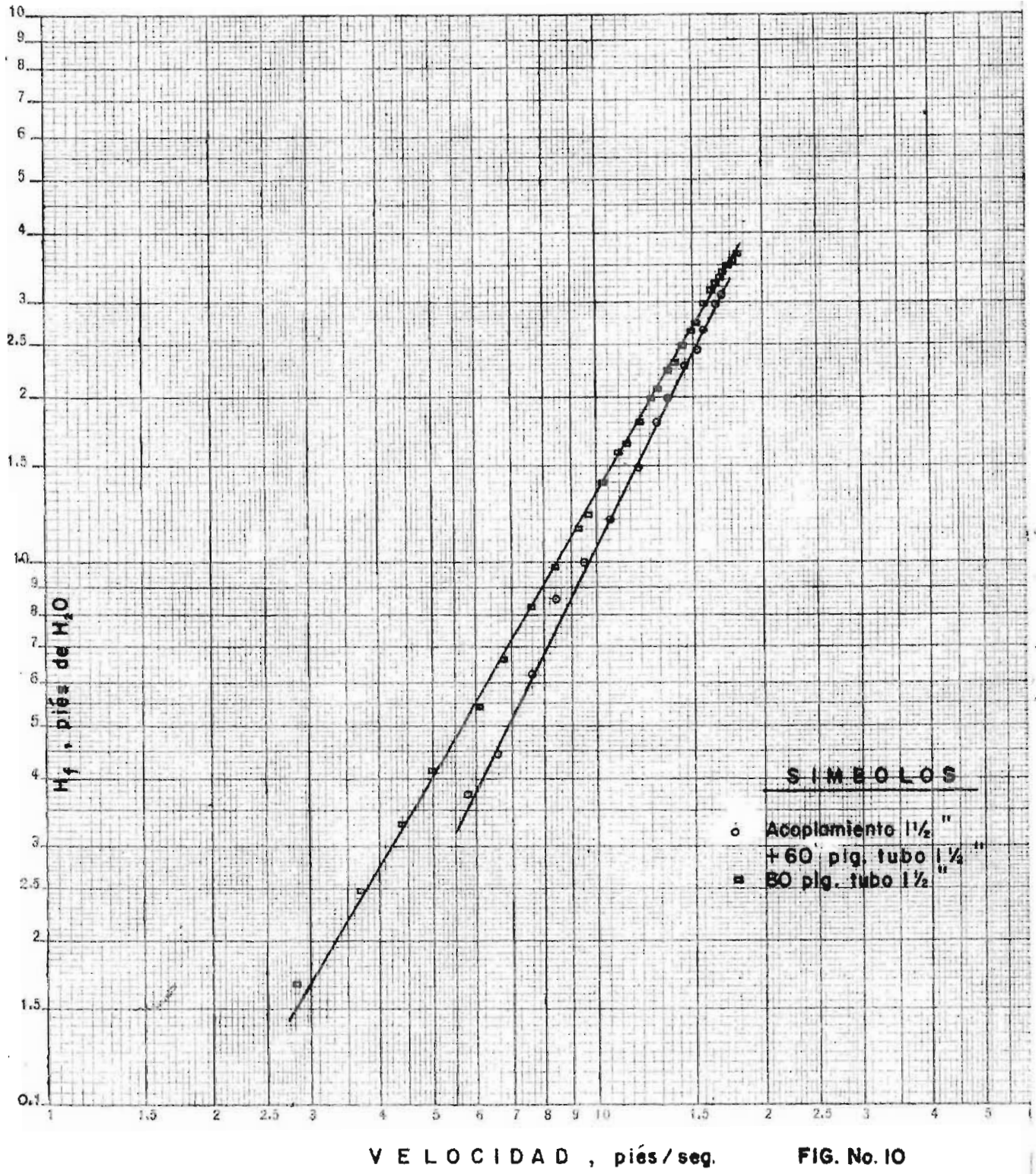


CURVAS DE CALIBRACION DEL MEDIDOR DE ORIFICIO F. J. MEJIA FIG. No. 7

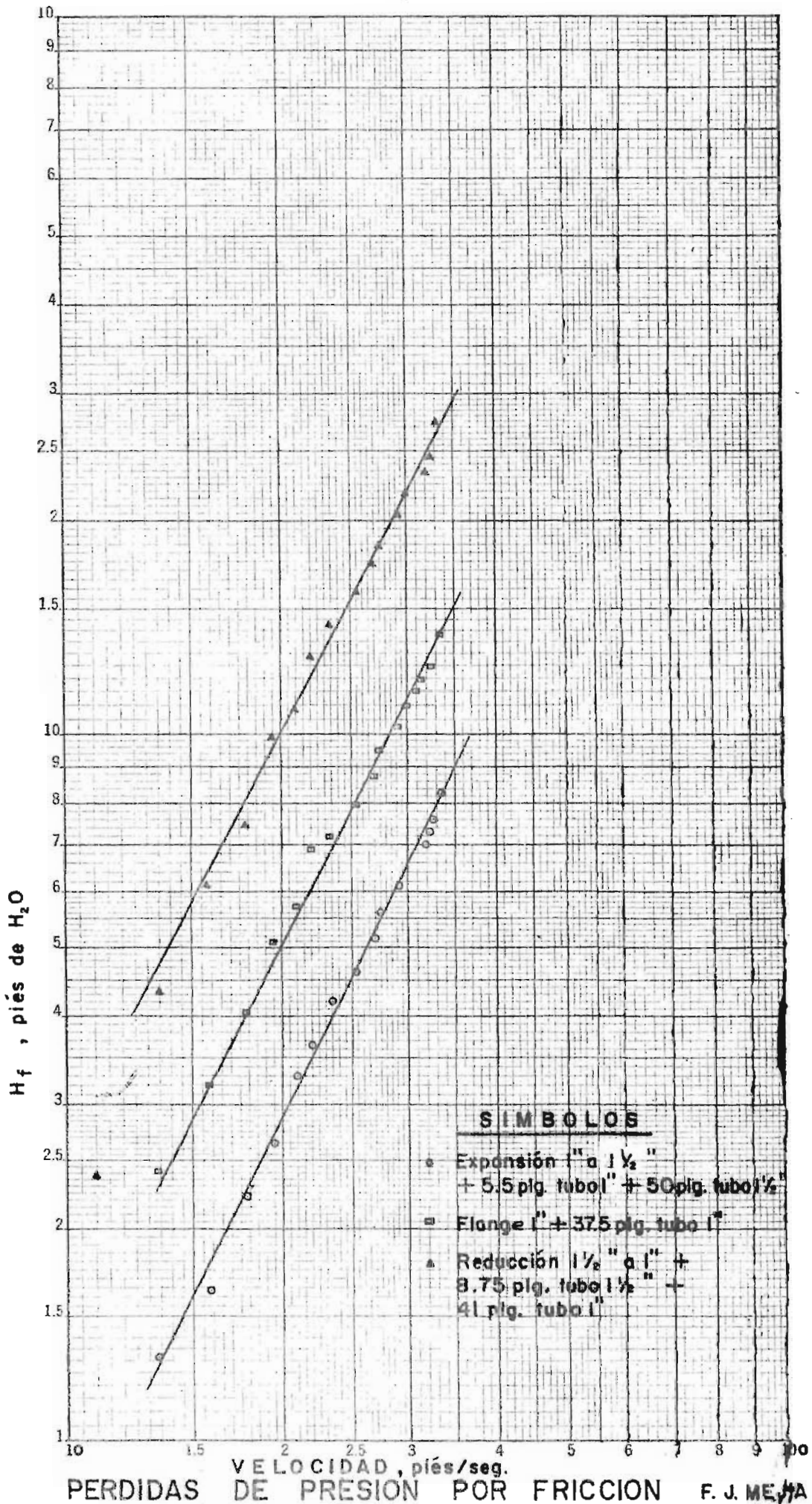


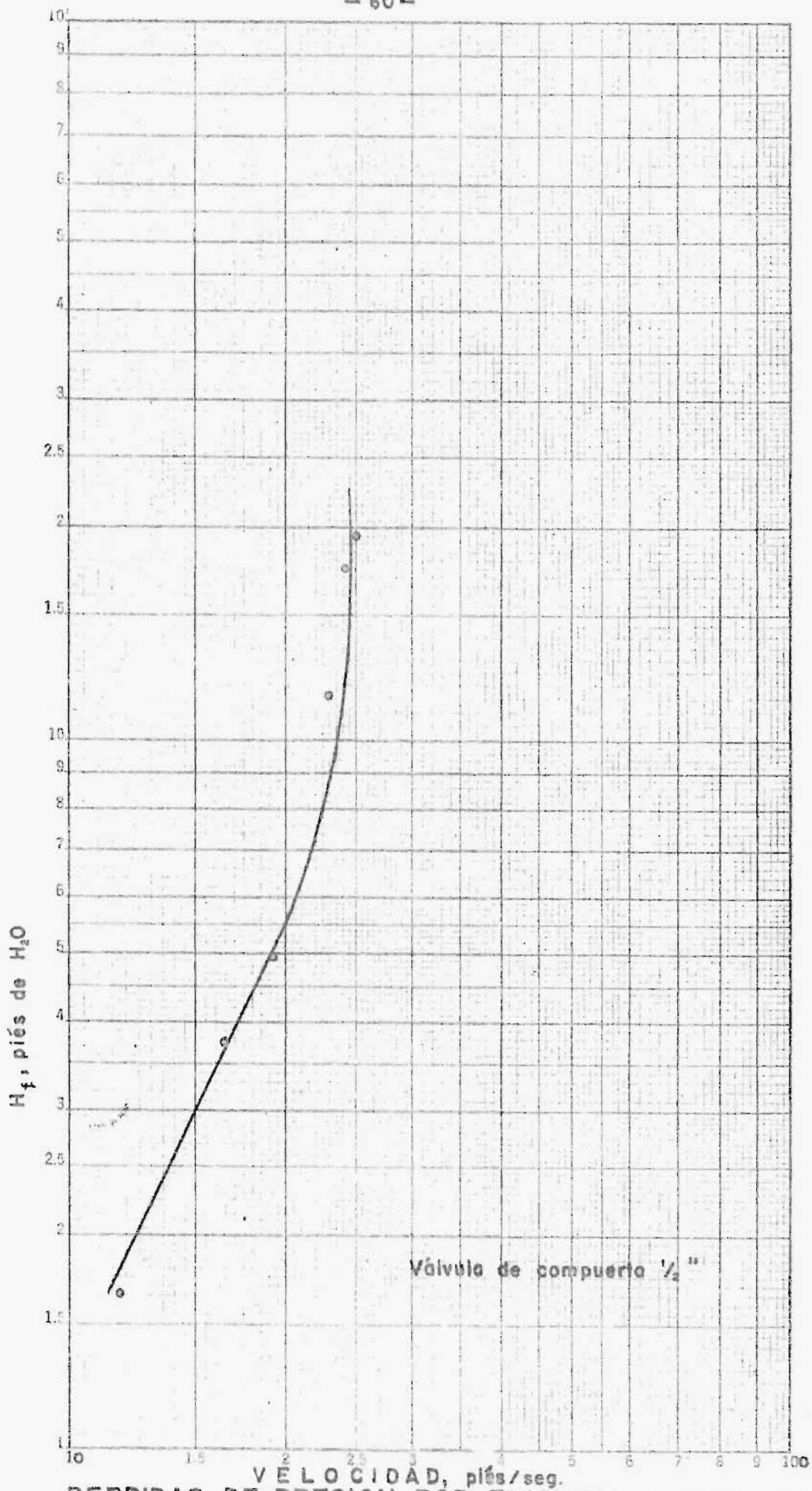




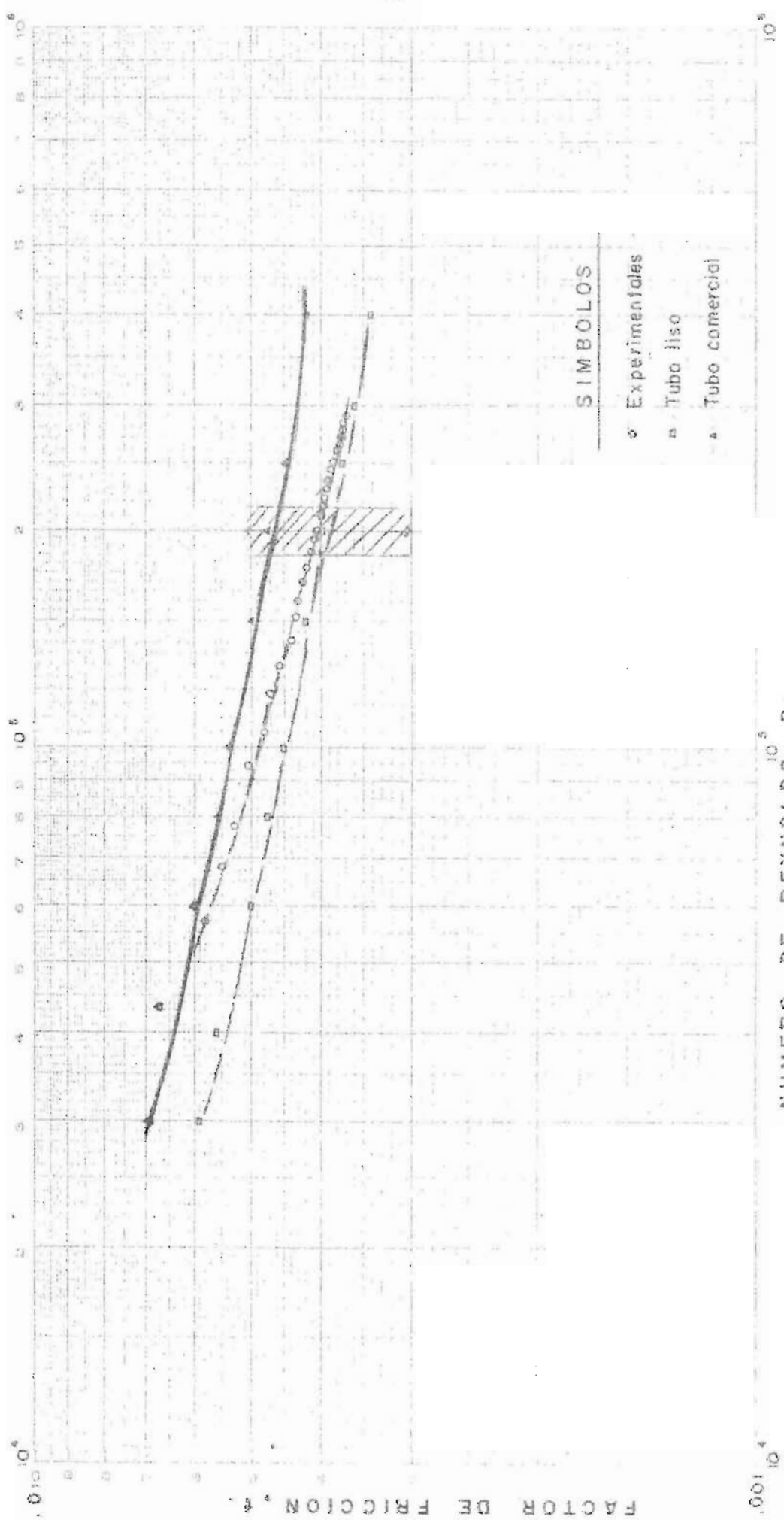


PERDIDAS DE PRESION POR FRICCIÓN FIG. No. 10  
F. J. MEJIA





PERDIDAS DE PRESION POR FRICCIÓN- F.J. MEJIA- FIG. No. 12



SIMBOLOS

- o Experimentales
- Tubo liso
- ▲ Tubo comercial

FACTORES DE FRICCION DE FANNING F. J. MEJIA FIG. No. 13

## DISCUSION DE RESULTADOS

### 1) Curvas de calibración del medidor de orificio.

Como puede observarse en la fig. 6, la variación del flujo volumétrico con la caída de presión en el medidor de orificio, sigue una línea casi recta en toda su extensión. Sin embargo, a pequeñas caídas de presión en el medidor se observa que hay puntos fuera de la línea, lo cual indica que en esta zona las determinaciones están más sujetas a oscilación en la columna de mercurio imposibilitando las lecturas precisas de escala.

Cuando se tienen caídas de presión grandes, también ocurren fenómenos similares, aunque menos notables. En este caso es el tiempo registrado en el cronómetro el que puede variar en alguna magnitud; así como también la medida del volumen que se hace por observación visual en el nivel del tanque de mediciones. Como se tienen altas velocidades de flujo, el volumen que quiere medirse se obtiene en un tiempo relativamente pequeño.

El mismo fenómeno se observa en las líneas de 1" y 1/2", pues también en estas secciones ocurren pequeñas fluctuaciones.

Los datos de las tablas I, II y III son tabulados de máxima caída de presión y máximo flujo permisible a mínima caída y mínimo flujo que es posible obtener.

Dada la escasa capacidad del tubo de 1/2", fue imposible obtener bastantes datos experimentales, pues la máxima caída de presión en el medidor es pequeña y por tanto también el flujo obtenido.

La figura 8 fue construida en base a los datos experimentales obtenidos para el tubo de 1.1/2". Por tal motivo, cualquier desviación en los valores para este tubo se refleja en los de 1" y 1/2", pues en su cálculo se utilizó la ecuación de continuidad.

Por tratarse de una gráfica teórica para 1" y 1/2", las líneas se extienden hasta la máxima caída de presión obtenida en el tubo de 1.1/2", lo cual no ocurre cuando se grafican los datos experimentales para las tres secciones.

## 2) Pérdidas de Presión por fricción en tubos y accesorios.

La figura 9 representa las pérdidas originadas en una válvula de globo de 1.1/2" abierta en su totalidad.

La correlación de puntos más o menos siguen una línea recta de acuerdo a la teoría, aunque con algunas variaciones positivas y negativas no muy notables. Para el tubo de 1/2" también se observa cierta correlación lineal y las pérdidas originadas en esta sección (11 pies de tubo 1/2") son de gran magnitud. Esto es explicable porque el tubo es de diámetro muy pequeño para la capacidad de la bomba.

En la figura 10 se han graficado las pérdidas originadas en 80 pulgadas de tubo recto de 1.1/2" y en un acoplamiento de 1.1/2". Se vé que las pérdidas en ambos casos son bastante similares, lo cual se explica si se toma en cuenta que un acoplamiento en sí, no da lugar a pérdidas considerables, pues la resistencia que opone al flujo es pequeña, dada su forma geométrica.

La figura 11 resume las pérdidas en accesorios del mismo diámetro, (flange, expansión y reducción). El resultado es que los tres accesorios originan pérdidas que aumentan en el orden siguiente: expansión, flange y reducción para velocidades lineales similares, como puede observarse en (18). Ver bibliografía.

Las pérdidas en las bridas (flanges) son muy similares a las originadas en tubo recto del mismo diámetro, pues en este caso fueron adaptadas a los extremos del tubo en tal forma, que casi son tubos continuos.



Las pérdidas por contracción son muy notables, aunque no se ha instalado una contracción súbita, sino un reductor. Sin embargo, en ambos casos (expansión y reducción) no sólo se registran en el manómetro las pérdidas originadas únicamente por los accesorios, sino también por las secciones de tubo recto incluidas.

En los cálculos hechos utilizando ecuaciones teóricas, se ha indicado la forma de tomar en cuenta dichas pérdidas. La correlación de datos teóricos y experimentales es muy parecida en  $\pm 10\%$  si se toma en cuenta los factores indicados anteriormente.

La figura 12 es exclusiva para una válvula de compuerta de 1/2". En esta válvula también se tienen pérdidas elevadas, debido a su tamaño en relación al tipo de bomba utilizado. No fue posible obtener muchos datos experimentales, pero con los que se tiene se puede ver una tendencia a formar una curva, lo cual indica que la válvula probablemente cambió su posición cuando se aumentó la presión del fluido.

El cálculo de factores de fricción de Fanning en la sección de tubo recto de 1/2" fue limitado por los escasos puntos obtenidos, observándose una discontinuidad en algunos de ellos. Por no ser posible la obtención de muchos datos experimentales no se puede ver en una zona más amplia, como variarían los puntos experimentales con relación a los reportados en Mc Adams (figura 6-11).

Cuando los resultados experimentales para pérdidas por fricción se comparan con los valores calculados de ecuaciones teóricas o empíricas o con valores reportados en la literatura, la discrepancia es en algunos casos grande, especialmente para pérdidas en expansión y contracción, válvulas y accesorios. Esto obedece a las siguientes consideraciones:

- a) Cuando se calculan las pérdidas en una expansión o contracción experimentalmente debe tomarse en cuenta que

el manómetro conectado a través del accesorio, no solamente mide las pérdidas permanentes en el accesorio, si no también las diferencias en cabezas de velocidad en ambos tubos.

- b) Dos válvulas o accesorios nunca son iguales y diferencia pequeña en su construcción, puede originar gran resistencia al flujo.

## CONCLUSIONES

De todo lo anterior puede deducirse que aunque los valores experimentales obtenidos no concuerdan exactamente con los reportados o calculados teóricamente, se ha logrado comprobar que los principios fundamentales del flujo de fluidos se cumplen en un sistema como el construido.

Para obtener resultados aún mejores, deberán hacerse algunos cambios donde ellos sean necesarios; pues sólo después de efectuar los experimentos se encuentran algunas fallas no previstas en las consideraciones preliminares.

Entre los cambios que es recomendable hacer están:

- 1.- La bomba actualmente instalada, pues ésta resulta demasiado grande para un sistema del tipo construido.
- 2.- La forma de medir volumen debe ser cambiado por el de pesada.  
Esto se logrará colocando sobre una báscula, el tanque de mediciones.

En "prefacio" se indicó que se puede acoplar equipo adicional al sistema para extender su uso a otros experimentos. Puede citarse como inmediato: Instalación de un rotámetro, también puede acoplarse el equipo adicional para determinar las curvas características de una bomba centrífuga, instalación de un medidor de Venturi, instalación de un tubo Pitot para determinar perfiles de velocidad.

A P E N D I C E

EJEMPLOS DE CALCULOS EFECTUADOS.

1) Datos de la Tabla I. Base: corrida #9

tiempo = 28.2 seg.

caída de presión en el orificio = 14.5 pulg. de mercurio

volumen colectado = 5.20 pies<sup>3</sup>

a) Cálculo del flujo volumétrico:

$$Q = \text{Volumen}/\text{tiempo}$$

$$Q = \frac{5.20 \text{ pies}^3}{28.20 \text{ seg.}} = 0.185 \text{ pies}^3/\text{seg.}$$

b) Cálculo de la velocidad, pies/seg.

$$Q = u A$$

$$u = Q/A$$

$$u = \frac{0.185 \text{ pies}^3/\text{seg}}{0.01414 \text{ pies}^2}$$

$$u = 13.1 \text{ pies/seg.}$$

(El área seccional interna del tubo de 1.1/2" es = 0.01414 pies<sup>2</sup>)

c) Cálculo del número de Reynolds

$$Re = D u \rho/\mu$$

$$D.I. = 1.61 \text{ pulg. } \delta 1.61/12 \text{ pies}$$

$$\rho = 62.17 \text{ lbm/pie}^3 \text{ a } 30^\circ\text{C (temperatura promedio de operación)}$$

$$\mu = 0.815 \text{ cp (centipoises) } \delta 0.815 \times 6.72 \times 10^{-4} \text{ lbm/pie-seg.}$$

$$Re = \frac{(1.61/12)(\text{pies})(13.1 \text{ pies/seg.})(62.17 \text{ lbm/pie}^3)}{0.815 \times 6.72 \times 10^{-4} \text{ lbm/pie-seg.}}$$

$$Re = 199500 \text{ (número adimensional)}$$

Los datos de las tablas II y III se calcularon en la misma forma.

2) Cálculos de los datos de la tabla IV ) (Pág. 47)

Los datos de la tabla IV se calcularon utilizando como referencia, los datos experimentales obtenidos para el tubo de 1.1/2".

Para calcular la velocidad en los tubos de 1" y 1/2" se aplicó la ecuación de continuidad como se muestra a continuación:

a) Cálculo de la velocidad en el tubo de 1"; D.I. = 1.049 pulg.

Base : corrida #9 (Tabla I, pág. 42)

Volumen colectado = 5.20 pies<sup>3</sup>

tiempo t = 28.2 seg.

Q = 5.20/28.2 pies<sup>3</sup>/seg.

Q = 0.185 pies<sup>3</sup>/seg.

flujo másico w = ρQ

Q = u A

w = u A ρ

La ecuación de continuidad (1) aplicada a ambas secciones sería:

$$w = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2$$

pero  $\rho_1 = \rho_2$  (fluido incompresible)

$$w = u_1 A_1 \rho = u_2 A_2 \rho$$

Los subíndices 1 y 2 se refieren a los tubos de 1.1/2" y 1" respectivamente)

$$\rho u_1 A_1 = u_2 A_2 \rho$$

$$u_2 = u_1 (A_1/A_2)$$

Area seccional interna del tubo de 1 pulg. = 0.006 pies<sup>2</sup>

Substituyendo valores:

$$u_2 = 13.1 \text{ pies/seg} \left( \frac{0.01414 \text{ pies}^2}{0.006 \text{ pies}^2} \right)$$

$$u_2 = 30.78 \text{ pies/seg.}$$

b) Tubo de 1/2 pulg.

$$\text{Area seccional interna} = 0.00211 \text{ pies}^2 = A_3$$

$$w = u_1 \rho A_1 = u_3 \rho A_3$$

$$u_3 = u_1 (A_1/A_3)$$

$$u_3 = 13.1 \text{ pies/seg} \left( \frac{0.01414 \text{ pies}^2}{0.00211 \text{ pies}^2} \right)$$

$$u_3 = 87.8 \text{ pies/seg.}$$

3) Cálculo de los datos de la tabla V ( pág. 48)

a) Conversión de la pérdida de cabeza en cm. de Hg. a pies de agua =

$$\left( \frac{\text{P.e.Hg} - \text{P.e.H}_2\text{O}}{\text{p.e. H}_2\text{O}} \right) \frac{\text{C m Hg}}{2.54 \text{ cm.Hg/pulg.} \times 12 \text{ pulg/pie}} = H_f$$

Substituyendo valores se obtiene:

$$H_f = \left( \frac{13.6-1.0}{1.0} \right) \left( \frac{\text{Cm Hg}}{30.48} \right)$$

$$H_f = 12.6/30.48 \text{ cm.Hg} = 0.415 \text{ cm.Hg}$$

EJEMPLO: CORRIDA # 7 (VALVULA DE GLOBO, TABLA V. (pág. 48)

$$\Delta h, \text{pulg Hg} = 21.00 \text{ (lectura del manómetro orificio)}$$

De la figura #7 (curva de calibración del medidor de orificio) se encuentra que para una caída de presión de 21.00 pulgadas, corresponde una velocidad de 16 pies/seg. para tubo 1.1/2",  $\Delta h = 66.3 \text{ cm.Hg}$  (lectura del manómetro, accesorio).

De donde substituyendo en la relación obtenida anteriormente:

$$H_f = 0.415 \times 66.3 = \underline{27.4} \text{ pies de agua}$$

La tabla V incluye todos los datos referentes a accesorios y por lo tanto se han calculado en la misma forma que se indicó anteriormente.

Aunque se tengan diferentes tipos de accesorios, la relación anterior es válida, pues en todos los casos se ha utilizado el mismo manómetro agua sobre mercurio.

CALCULO DE LOS FACTORES DE FRICCION UTILIZANDO LOS DATOS  
EXPERIMENTALES.

Longitud de tubo recto  $1\frac{1}{2}'' = 80$  pulgadas

Diámetro interno = 1.61 pulgadas

Fórmulas Utilizadas.

Para un fluido incompresible, la ecuación de Bernoulli, se transforma en una relación muy sencilla cuando se aplica entre dos puntos de una sección horizontal de diámetro uniforme.

Condiciones disponibles.

- a)  $A_1 = A_2$  puesto que  $D_1 = D_2$  y por la ecuación de continuidad  
 $u_1 = u_2$  ( $\rho = \rho_1 = \rho_2$ );  $\Delta u = 0$
- b) No hay bomba entre los puntos;  $-W_S = 0$
- c) La sección es horizontal;  $Z_1 = Z_2$  ( $\Delta Z = 0$ )

De acuerdo a las consideraciones anteriores, la ecuación (5) pág. 3, se reduce a la siguiente:

$$P_1/\rho_1 - P_2/\rho_2 = H_f = (P_1 - P_2)/\rho = \Delta P/\rho$$

La diferencia de presión entre ambos puntos (1 y 2) se registra en un manómetro diferencial, cuya ecuación es:

$$P_1 - P_2 = \Delta P = \Delta h (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) (g/g_c)$$

donde:  $\Delta h$  = deflexión de la columna de mercurio, pies.

$\rho_{Hg}$  y  $\rho_{H_2O}$  = densidades del mercurio y agua respectivamente

$$g_c = \text{factor de conversión, } 32.2 \frac{\text{lbm} \cdot \text{pie}}{\text{lbf} \cdot \text{seg}^2}$$

$g$  = aceleración de la gravedad, 32.2 pies/seg<sup>2</sup>



Expresada en términos de  $H_f$  (pérdidas de presión por fricción) se obtiene la siguiente ecuación:

$$H_f = \frac{\Delta h (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) (g/g_c)}{\rho_{H_2O}}$$

La ecuación de Fanning (9) pag. 5, representa también las pérdidas de presión por fricción. Por lo tanto puede substituirse en la ecuación anterior obteniéndose:

$$4 f (L/D) (u^2/2g_c) = \frac{\Delta h (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) (g/g_c)}{\rho_{H_2O}}$$

Por simplificación de la ecuación se obtiene:

$$\frac{(\Delta h) (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) (g)}{\rho_{H_2O}} = 2 f (L/D) (u^2)$$

pero  $\rho_{Hg}/\rho_{H_2O}$  = peso específico del mercurio

y  $\rho_{H_2O}/\rho_{H_2O}$  = peso específico del agua

así:  $\Delta h (P.e. Hg - P.e. H_2O) (g) = 2 f (L/D) (u^2)$

Despejando  $f$  (factor de fricción);

$$f = \frac{(P.e. Hg - P.e. H_2O) \Delta h g D}{2 L u}$$

Datos que pueden substituirse:

$$P.e. Hg = 13.6$$

$$P.e. H_2O = 1.0$$

$$g = 32.2 \text{ pies/seg}^2$$

$$D = 1.61 \text{ pulg. } \text{ó} \text{ } 1.61/12 \text{ pies}$$

$$L = 80 \text{ pulg. } \text{ó} \text{ } 6.68 \text{ pies (distancia entre tomas de presión).}$$

NOTA: El manómetro utilizado para registrar las caídas de

presión, está graduado en cm. Luego para tener la ecuación para "f" en las mismas unidades se hará la conversión de cm. a pies.

$$\Delta h \text{ (pies Hg)} = \Delta h \text{ (cm Hg)} \left( \frac{1 \text{ pulg Hg}}{2.54 \text{ cm Hg}} \right) (1 \text{ pie}/12 \text{ pulg})$$

de donde  $\Delta h/12 \times 2.54 = \text{pies de mercurio}$

Substituyendo valores:

$$f = \frac{(13.6 - 1) (32.2 \text{ pies/seg}) (1.61/12 \text{ pies}) (\Delta h/30.48 \text{ pies})}{(2) (6.68 \text{ pies}) u^2 (\text{pies}^2/\text{seg}^2)}$$

$$f = \frac{(12.6) (32.2) (1.61)}{(12) (2) (6.68) (30.48)} (\Delta h/u^2) \text{ adimensional}$$

Resolviendo:

$$f = 0.1335 \Delta h/u^2$$

Ejemplo de cálculo: Corrida 15, tabla VI. (Pág. 52)

$$\Delta h \text{ (medidor de orificio)} = 14.5 \text{ pulg. Hg}$$

De la curva de calibración (fig. 7) se encuentra que  $u = 13.1 \text{ pies/seg.}$

$$\Delta h \text{ (manómetro accesorio)} = 5 \text{ cm Hg.}$$

Por tanto:

$$f = 0.1335 \times 5/13.1^2$$

$$f = 0.00402$$

CALCULO DE ERRORES EXPERIMENTALES <sup>(10)</sup>

Cantidades sujetas a error en las mediciones:

- a) Tiempo necesario para obtener 5.20 pies<sup>3</sup>. Este tiempo se determina utilizando un cronómetro que se acciona en el instante que el flujo cae al tanque de mediciones y se para justamente cuando el nivel indica el volumen anterior. El tiempo que se pierde en arrancar y parar se determinó que es 1 seg.
- b) Diámetro interno del tubo. Todos los datos referentes a diámetros se han calculado usando los valores reportados para tubos comerciales. En el caso del caño de 1.1/2" se usó el valor 1.61 pulg. como diámetro interno Sched. 40, habiendo tomado también los correspondientes a 1 pulg. y 1/2 pulg. en los casos necesarios.

Para comprobar qué tan exacto es el valor reportado, se midieron diferentes caños y se encontró que los valores del diámetro real, difieren del teórico en  $\pm 1$  mm.

$$\text{Diámetro real} = 41 \text{ mm.} + 1 \text{ mm (1.61 pulg.} \equiv 41 \text{ mm.)}$$

- c) Volumen medido. La determinación exacta del volumen tomado igual en la mayoría de ensayos, también es una fuente de error, aunque no tan grande, pues las marcas indicadores son muy visibles. Sin embargo, puede establecerse que 0.05 pies<sup>3</sup> se desvía positiva o negativamente en cada medición.
- d) Las propiedades físicas del agua, tal como densidad y viscosidad, pueden tomarse como aproximadamente exactos y constantes a la temperatura de operación.
- e) Caída de presión leída en los manómetros. Es imposible evitar que los extremos de la columna de mercurio oscile en su posición, debido al movimiento mismo del fluido dentro del caño. La oscilación determinada para el manómetro de Hg-H<sub>2</sub>O cuya escala está

graduada en cm. es de  $\pm 0.2$  cm.

- f) El valor de la aceleración de la gravedad puede tomarse exacto. Basado en las condiciones anteriores, se calculará a continuación el error cometido en el cálculo del factor de fricción  $f$  y el número de Reynolds, fig. 13,  $f$  vrs.  $Re$ . (Pág. 61)

Base de cálculos: corrida #9, Tabla I. (Pág. 42)

- a) Cálculo del cambio en el número de Reynolds:  $\Delta Re$  ?

$$Re = D u \rho / \mu = G D / \mu = G D / \mu = \frac{(w/A) (D)}{\mu} = \frac{w D}{\pi D^2 / 4 \mu} = 4 w / \pi D \mu$$

$$w = \rho u A$$

$$w = \rho Q, (u A = Q)$$

$$Re = 4 Q \rho / \pi D \mu$$

Ahora se substituye  $Q$  por su equivalente  $V/t$ , siendo  $V$  el volumen medido y  $t$  el tiempo necesario para obtener el volumen  $V$ .

$$Re = 4 (V/t) \rho / \pi D \mu$$

La expresión que relaciona la función con las cantidades que se consideran inexactas es en este caso.

$$\Delta Re = (\partial Re / \partial V) \Delta V + (\partial Re / \partial t) \Delta t + (\partial Re / \partial D) \Delta D$$

Las cantidades que se necesitan son:

$$\partial Re / \partial V = (4 \rho / \pi D \mu t) \Delta V + (4 V \rho / \pi D \mu) (-1/t^2) \Delta t + (4 V \rho / \pi \mu t) (-1/D^2) \Delta D$$

Cantidades que se substituyen:

$$D = 41 \text{ mm.} \pm 1.0 \text{ mm.} \quad \delta D = 1.61 \text{ pulg.} \pm 0.0394 \approx 0.04 \text{ pulg.}$$

$$V = 5.20 \pm 0.05 \text{ pies}^3$$

$$t = 28.2 \pm 1 \text{ seg.}$$

$\rho, \mu$  se considerarán constantes.

El término  $4 \rho / \pi D \mu t$  representa el cambio Re/volumen

El término  $(4 \rho V / \pi D \mu) (-1/t^2)$  representa el cambio Re/tiempo

El término  $(4 \rho V / \pi \mu t) (-1/D^2)$  representa el cambio Re/diámetro

Luego pueden substituirse los valores de Re y las otras cantidades que son conocidas,

$$Re = 2 \times 10^5 \text{ (ver tabla I, corrida 9, pág.42)}$$

$$(Re/V) \Delta V = \frac{2 \times 10^5 \times .05 \text{ pies}^3}{5.20 \text{ pies}^3} = 1920$$

$$(Re/t) \Delta t = \frac{2 \times 10^5 \times 1 \text{ seg}}{28.2 \text{ seg}} = 0.071 \times 10^5 \approx 7.1 \times 10^3$$

$$(Re/D) (\Delta D) = \frac{2 \times 10^5 \times 0.04 \text{ pulg.}}{1.61 \text{ pulg.}} = 0.0496 \times 10^5 = 4.96 \times 10^3$$

$$\Delta Re = 1920 + 7100 + 4960$$

$$\Delta Re = 1.398 \times 10^4 = .1398 \times 10^5 = .14 \times 10^5$$

$$Re = 2 \times 10^5 \pm 0.14 \times 10^5$$

$$Re = (2 \pm 0.14) 10^5$$

El mismo resultado se obtiene si se substituyen los valores para cada derivada parcial obtenida.

Para obtener la máxima desviación, se tomarán positivo el valor de Re/V y negativos los restantes.

$$\begin{aligned} \Delta Re = & \frac{4 \times 62.17 \times 12 \times (0.05)}{3.14 \times 1.61 \times .815 \times 6.72 \times 10^{-4} \times 28.2} + \frac{4 \times 5.2 \times 62.17 \times 12 \times 1}{3.14 \times 1.61 \times .815 \times 6.72 \times 10^{-4}} (1/28.2^2) \\ & + \frac{4 \times 5.20 \times 62.17}{3.14 \times .815 \times 6.72 \times 10^{-4} \times 28.2} (0.04/12) (12^2/1.61^2) \end{aligned}$$

$$\Delta Re = 1915 + 7060 + 4955$$

$$\Delta Re = 13950 \pm 0.1395 \times 10^5 \approx 0.14 \times 10^5$$

Obsérvese la estrecha correlación entre ambos resultados obtenidos.

Cálculo de  $f \pm \Delta f$

Ecuación de Fanning:  $H_f = 4f (L/D) (u^2/2g_c) = \Delta P_f / \rho H_2O$

$$\Delta P / \rho H_2O = \frac{(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) (\Delta h) (g/g_c)}{\rho_{H_2O}}$$

$$4 f (L/D) (u^2/2g_c) = \frac{(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) (\Delta h) (g/g_c)}{\rho_{H_2O}}$$

$$4 f (L/D) (u^2/2g_c) = (P.e. Hg - P.e. H_2O) (\Delta h) (g/g_c)$$

Simplificando y despejando  $f$  se obtiene finalmente:

$$f = \frac{(P.e.Hg - P.e.H_2O) (\Delta h) (g) (D)}{2 L u^2}$$

Expresando la velocidad  $u$  en función del flujo volumétrico y área se tiene:

$$u = Q/A = 4 Q / \pi D^2$$

Al substituir el valor de  $u$  en la ecuación para  $f$  se llega al siguiente resultado:

$$f = \frac{(g) (\Delta h) (P.e.Hg - P.e.H_2O) D^5 \pi^2}{2 L Q^2 4^2}$$

$$f = (g) (\Delta h) (P.e.Hg - P.e.H_2O) \left( \frac{D^5 \pi^2 t^2}{4^2 2 \times L V^2} \right)$$

$$f = g (\Delta h) (P.e.Hg - P.e. H_2O) \left( \frac{D^5 \pi^2 t^2}{32 L V^2} \right)$$

$g$ ,  $(P.e. Hg - P.e. H_2O)$ ,  $L$ ,  $\pi$  se considerarán constantes y exactas.

$\Delta h$ ,  $D$  y  $V$  están sujetas a error.

Por consiguiente se calculará  $\Delta f$  derivando parcialmente la función  $f$  con respecto a cada cantidad en mención.

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial (\Delta h)} \right| \Delta (\Delta h) + \left( \frac{\partial f}{\partial D} \right) \Delta D + \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right) \Delta t + \left( \frac{\partial f}{\partial V} \right) \Delta V$$

$$\frac{\partial f}{\partial (\Delta h)} = (g) (P.e.Hg - P.e.H_2O) \frac{D^5 \pi^2 t^2}{32 L V^2}$$

$$\frac{\partial f}{\partial D} = (g) (\Delta h) (P.e.Hg - P.e.H_2O) \left( \frac{\pi^2 t^2}{32 L V^2} \right) 5 D^4$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = (g) (\Delta h) (P.e.Hg - P.e.H_2O) \frac{D^5 \pi^2}{32 L V^2} (2 t)$$

$$\frac{\partial f}{\partial V} = (g) (\Delta h) (P.e.Hg - P.e.H_2O) \left| \frac{D^5 \pi^2 t^2}{32 L} \right| (-2/V^3)$$

Estos valores se pueden substituir en la ecuación para  $f$  pero por razones de espacio no se hará la substitución.

Como en el caso precedente se puede calcular el valor de cada término, obteniendo el siguiente resultado, para un cambio fi nito:

$$\Delta f = (f/\Delta h) \Delta (\Delta h) + (5 f/D) (\Delta D) + (2 f/t) \Delta t + (-2 f/V) \Delta V$$

como antes, se conocen las siguientes cantidades:

$$t = 28.2 \text{ seg} \pm 1 \text{ seg}$$

$$V = 5.2 \text{ pies}^3 \pm .05 \text{ pies}^3$$

$$D = 1.61 \text{ pulg.} \pm 0.04 \text{ pulg.}$$

$$\Delta h = 5 \text{ cm. Hg} \pm 0.2 \text{ cm. Hg}$$

TABLA I, corrida 9  
(pag. 42)

De la tabla VI, corrida 15, pág. 52 se obtiene el valor pa ra  $f = 0.00402$

$$\Delta h = 5 \text{ cm.Hg} \pm 0.2 \text{ cm.Hg}$$

substituyendo valores

$$f = \left( \frac{0.00402}{5 \text{ cm.Hg}} \right) (0.2 \text{ cm.Hg}) + \left( \frac{(5)(0.00402)}{1.61 \text{ pulg.}} \right) (0.04 \text{ pulg.})$$

$$+ \left( \frac{2 \times 0.00402}{28.2 \text{ seg.}} \right) (1 \text{ seg.}) + \left( \frac{2 \times 0.00402}{5.20 \text{ pies}^3} \right) 0.05 \text{ pies}^3$$

Resolviendo:

$$\Delta f = 0.000497 + 0.000161 + 0.000285 + 0.0000775$$

$$\Delta f = 0.001021 \quad \text{y} \quad f = 0.00402 \pm 0.00102$$

En la figura 13 se ha indicado el área de error para los valores antes calculados. Se observa que el área sombreada cubre tanto la curva de  $f$  vs  $Re$  para tubo liso y tubo comercial dado por Mc Adams<sup>(8)</sup> en Fig. 6-11 (pág.156).

Los valores utilizados son mostrados a continuación:

$$f = 0.00402$$

$$\Delta f = 0.00102$$

$$\text{Desviación positiva: } 0.00402 + .00102 = \underline{\underline{0.00504}}$$

$$\text{Desviación negativa: } 0.00402 - 0.00102 = \underline{\underline{0.00300}}$$

$$Re = 2 \times 10^5$$

$$\Delta Re = 0.14 \times 10^5$$

$$\text{Desviación positiva: } 2.00 \times 10^5 + 0.14 \times 10^5 = 2.14 \times 10^5$$

$$\text{Desviación negativa: } 2.00 \times 10^5 - 0.14 \times 10^5 = 1.86 \times 10^5$$



Cálculo de pérdidas de presión por fricción en tubos y accesorios por medio de ecuaciones reportadas en la literatura.

1) Tubo recto de 1.1/2". Datos de la tabla VI, pág. 52

Corrida #15

Datos: L = 80 pulg. u 80/12 pies

u = 13.1 pies/seg

g = 32.2 pie/seg

D.I. = 1.61 pulg.

Ecuación de Fanning modificada<sup>(3, 13, 15)</sup>

$$H_f = 4 f (L/D) (u^2/2g) \text{ pies de fluido}$$

Para  $Re = 2 \times 10^5$  se encuentra de la fig. 6-11 (Mc Adams)<sup>(8)</sup>  
que  $f = 0.00480$

Substituyendo valores se tiene:

$$H_f = 4 \times .0048 \left( \frac{6.68 \times 12}{1.61} \right) \left( \frac{13.1^2}{2 \times 32.2} \right) \frac{(\text{pies/pies})(\text{pies}^2/\text{seg}^2)}{\left( \frac{\text{pies}}{\text{seg}^2} \right)}$$

= 2.5 pies de agua

El valor calculado de los datos experimentales es 2.07.

Para  $Re = 1.52 \times 10^5$  el valor de  $f = 0.005$  corrida #8:

$$H_f = 4 \times .005 \times \left( \frac{6.68 \times 12}{1.61} \right) \left( \frac{16.2^2}{2 \times 32.2} \right)$$

$$H_f = 4 \text{ pies de agua}$$

2) Válvula de globo 1.1/2" + 60 pulg. tubo 1.1/2".

Datos de tabla V y fig. 6-11 (Mc Adams)<sup>(8)</sup>

Corrida #1

De tabla 3-2 Coulson<sup>(3)</sup>, el valor de la longitud equivalente para válvula de globo es 300 diámetros de tubo.

$L_e = 300$  diámetros de tubo

$u = 18$  pies/seg

Ecuación de Fanning aplicada en este caso es:

$$H_f = 4f (L_e/D) (u^2/2g)$$

donde  $L_e = 300$  diámetros. El valor que debe substituirse es:

$$\frac{300 \times 1.61 \text{ pulg}}{12 \text{ pulg}} \times \text{pie} = \frac{300 \times 1.61 \text{ pies}}{12}$$

Para  $Re = 2.75 \times 10^5$ , el valor de  $f = 0.005$

$$H_f = 4 \times .005 \left( \frac{300 \times 1.61}{12 \times 1.61} \right) \times 12 \left( \frac{18^2}{2 \times 32.2} \right)$$

$$H_f = 27.4 \text{ pies de agua}$$

El valor correspondiente a esta velocidad es 34.9, tabla V, pero está incluido en él, las pérdidas originadas en el tubo recta (60 pulg.).

De la figura 10, a una velocidad de 18 pies/seg. corresponde un  $H_f$  de 3.6 pies de agua en 6.68 pies y para 60 pulg. sería:

$$3.6/6.68 \times 5.0 = 2.7 \text{ pies de agua}$$

El valor anterior sumado al calculado según la ecuación de Fanning modificada (sólo incluye la válvula) da como resultado 31.2, siendo más aproximado al experimental.

Otro caso. Corrida 14, Tabla V.

$u = 13.1$  pies/seg.;  $Re = 2 \times 10^5$  y  $f = 0.005$

$$H_f = 4 \times 0.005 \times 300 \times 13.1^2/64.4 = 15.9 \text{ pies de agua}$$

De la figura 10 para 13.1 pies/seg. corresponde un  $H_f$  de 0.05 pies por 6.68 pies y por 5 pies es 1.58 pies de agua.

$$H_f = 15.9 + 1.54 = 17.45 \text{ pies de agua}$$

El valor calculado para este ensayo fue 18.6 pies de agua

3) 11 pies de tubo 1/2"

Datos de tabla V

$$H_f = 4 f (L/D) (u^2/2g)$$

a) Para  $u = 11.75$  pies/seg se obtiene  $11.75 \times 5.9 \times 10^3 = 6.92 \times 10^5$

De la fig. 6.12 (Mc Adams)<sup>(8)</sup> se encuentra  $f = 0.0059$

$$H_f = 4 \times 0.0059 \times 11/0.622 \times 12 \times 11.75^2/2 \times 32.2$$

$$H_f = 10.8 \text{ pies de agua}$$

El valor calculado de datos experimentales fue 11.0 pies de agua

b)  $u = 16.5$  pies/seg;  $Re = 9.7 \times 10^4$  y  $f = 0.0056$

$$H_f = 16.5 \times .0056 \times 11/0.622 \times 12 \times 16.5^2/2 \times 32.2$$

$$= 20.4 \text{ pies de agua}$$

valor experimental 20.75 pies de agua

c)  $u = 22.9$  pies/seg y  $Re = 1.35 \times 10^5$ ;  $f = .00525$

$$H_f = 4 \times .00525 \times 11/.622 \times 12 \times 22.9^2/2 \times 32.2$$

$$= 40 \text{ pies de agua}$$

valor experimental = 39.5 pies de agua

4) Expansión.

Corrida #2, Tabla V, pag. 48

$u = 32.60$  pies/seg (velocidad en tubo de 1")

Ecuación de Borda-Carnot (Perry-Sección 5, pág. 5-31)<sup>(11)</sup>

aplicado a una expansión en flujo turbulento:

$$H_{fe} = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g} = u_1^2/2g (1 - A_1/A_2)^2$$

pero  $(1 - A_1/A_2)^2 = K$  (ecuación 10, pág. 6)

Los subíndices 1 y 2 se refieren a las velocidades en el tubo de 1" y 1/2" respectivamente.

Cálculo del valor de K;

$$K = (1 - 0.006 \text{ pies}^2/0.01414 \text{ pies}^2) = (1 - 0.425)^2 = 0.33$$

$$u = 32.6 \text{ pies/seg}$$

Substituyendo:

$$H_{fe} = 0.33 \times 32.6^2/64.4 \left( \frac{\text{pies}^2}{\frac{\text{seg}}{\text{pies}^2}} \right)$$

$$= 5.40 \text{ pies de fluido}$$

El valor experimental reportado es 7.62 pies de agua, pero éste incluye además las pérdidas en 5.5 pulg. tubo 1" + 50 pulg. tubo 1/2". De la figura 10 se encuentra que para 6.68 pies de tubo corresponde una pérdida de 2.2 pies aproximadamente. Para 4.16 pies se tiene 1.37 pies.

Sumado el valor anterior se obtiene  $5.40 + 1.37 = 6.77$  pies. Aún no se ha incluido las pérdidas en la parte de tubo de 1".

Cálculos similares se obtienen para otros datos experimentales.

Cálculo de los factores de fricción en el tubo de 1/2" a partir de datos experimentales.

Datos de la tabla V, pag. 48

La fórmula derivada para  $f$  en función de las lecturas del manómetro fue:

$$f = \left( \frac{P_{e.Hg} - p_{e.H_2O}}{2 L u^2} \Delta h g D \right) \text{ (ver cálculos para tubo } 1.1/2\text{'')}$$

$$P_{e.Hg} - P_{e.H_2O} = 12.6$$

$$L = 11 \text{ pies}$$

$$\Delta h \text{ en pies} = \Delta h(\text{cm.})/12 \times 2.54$$

$$D = 0.622'' \text{ ó } 0.622/12 \text{ pies}$$

$$g = 32.2 \text{ pies/seg}^2$$

Substituyendo valores:

$$f = \frac{12.6 \times 32.2 \times 0.622/12}{2 \times 11 \times 30.48} (\Delta h/u^2)$$

$$f = 0.0314 \Delta h/u^2$$

$$f_1 = 0.0314 \quad 26.5/138$$

$$f_1 = 0.00601 \text{ para } u = 11.75 \text{ pies/seg y } \Delta h = 26.5 \text{ cm.}$$

$$f_2 = 0.0314 \times 50/274, (u = 16.5 \text{ pies/seg, } \Delta h = 50 \text{ cm.}) = 0.00572$$

$$f_3 = 0.0314 \times 78.7/375, \quad u = 19.30 \text{ pies/seg, } \Delta h = 78.7 \text{ cm}$$

$$f_3 = 0.00652$$

$$f_4 = 0.0314 \times 95.5/528 \quad \Delta h = 95.5 \text{ cm. y } u = 22.9 \text{ pies/seg}$$

$$f_4 = 0.00568$$

$$f_5 = 0.0314 \times 113.5/580 = 0.00612; \quad \Delta h = 113.5 \text{ cm.,}$$

$$u = 22.9 \text{ pies/seg}$$

$$f_6 = 0.0314 \times 124.5/625 = 0.0062; \quad \Delta h = 124.5 \text{ cm.,}$$

$$u = 25 \text{ pies/seg.}$$

Usando las velocidades y el factor  $5.9 \times 10^3$  dado en la tabla III, pag. 46 se obtuvieron los siguientes números de Reynolds.

$$Re_1 = 5.9 \times 10^3 \times 11.75 = 6.92 \times 10^4$$

$$Re_2 = 5.9 \times 10^3 \times 16.50 = 9.72 \times 10^4$$

$$Re_3 = 5.9 \times 10^3 \times 19.3 = 1.14 \times 10^5$$

$$Re_4 = 5.9 \times 10^3 \times 22.9 = 1.36 \times 10^5$$

$$Re_5 = 5.9 \times 10^3 \times 24 = 1.42 \times 10^5$$

$$Re_6 = 5.9 \times 10^3 \times 25 = 1.50 \times 10^5$$

Los valores de  $f$  tomados de la fig. 6-11 (Mc Adams) <sup>(8)</sup> para los números de Reynolds anteriores son:

$$f_1 = 0.00600$$

$$f_2 = 0.00570$$

$$f_3 = 0.00560$$

$$f_4 = 0.00540$$

$$f_5 = 0.00520$$

$$f_6 = 0.00510$$

Si se comparan los resultados anteriores con los calculados de datos experimentales se observa alguna correlación sólo en pocos valores. Como no se logró obtener muchos datos experimentales es imposible predecir las correlaciones en una zona más amplia.

Los valores para  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_4$  son los más cercanos.

NOMENCLATURA

- A - Area seccional interna del tubo normal al flujo, pies<sup>2</sup>
- D - Diámetro del tubo, pies
- D<sub>o</sub> - Diámetro del medidor de orificio, pies
- f - factor de fricción en la ecuación de Fanning, adimensional
- g - Aceleración de la gravedad, 32.17 pies/seg<sup>2</sup>
- g<sub>c</sub> - Factor de conversión de Newton, 32 π  $\frac{\text{lbm-pie}}{\text{lb}_f\text{-seg}^2}$
- G - Velocidad másica, w/A,  $\frac{\text{lbm}}{\text{pie}^2\text{-seg}}$
- H<sub>f</sub> - Pérdidas totales por fricción en la ecuación de Fanning,  $\frac{\text{pies-lb}_f}{\text{lbm}}$
- H<sub>fc</sub> - Pérdidas por fricción en una contracción súbita,  $\frac{\text{pies-lb}_f}{\text{lbm}}$
- H<sub>fe</sub> - Pérdidas por fricción en una expansión súbita,  $\frac{\text{pies-lb}_f}{\text{lbm}}$
- K<sub>c</sub> - Coeficiente de contracción en la ecuación para pérdidas por fricción en una contracción súbita
- K<sub>e</sub> - Coeficiente de expansión en la ecuación para pérdidas por fricción en una expansión súbita
- K - Factor en la ecuación<sup>(6)</sup> K = Q<sub>m</sub>/LD<sup>2</sup>
- L - Longitud de tubo recto, pies
- L<sub>e</sub> - Longitud equivalente a tubo recto de válvulas y accesorios
- P - Presión, lb<sub>f</sub>/pie<sup>2</sup>; también se ha utilizado para indicar la potencia de la bomba en H.P.
- Q - Flujo volumétrico,  $\frac{V}{T}$  en pies<sup>3</sup>/seg
- Q<sub>o</sub> - Flujo volumétrico en el orificio
- Q<sub>m</sub> - Flujo volumétrico máximo en gal/hr (ecuación 6)
- Re - Número de Reynolds,  $\frac{D u \rho}{\mu}$  adimensional
- Re<sub>o</sub> - Número de Reynolds,  $\frac{D_o u_o \rho}{\mu}$  en el medidor de orificio
- t - tiempo, medido en segundos
- u - velocidad promedio del flujo Q/A,  $\frac{\text{pies}}{\text{seg}}$
- u<sub>o</sub> - Velocidad promedio del flujo en el orificio  $\frac{Q_o}{A_o}$ ,  $\frac{\text{pies}}{\text{seg}}$
- V - Volumen medido en las corridas, pies<sup>3</sup>
- w - Velocidad de flujo másico, ρ u A, lbm/seg

- $W_s$  - Trabajo neto agregado al flujo (cc. Bernoulli)  $\frac{\text{pies-lbf}}{\text{lbm}}$
- $W$  - Trabajo total hecho por la bomba
- $Z$  - Distancia vertical de un punto cualquiera del sistema con relación a un plano de referencia, pies.

### LETRAS GRIEGAS

- $\Delta$  - (Delta) - Diferencia finita entre dos cantidades
- $\partial$  - Operador diferencial parcial.
- $\rho$  - (Rho) - Densidad del fluido,  $\text{lbm/pie}^3$
- $\pi$  - (Pi) - 3.14.16 ...
- $\mu$  - (Mu) - Viscosidad absoluta del fluido,  $\frac{\text{lbm}}{\text{pie-seg}}$   
 $\mu \left( \frac{\text{lbm}}{\text{pie-seg}} \right) = \text{viscosidad en centipoise} \times 6.72 \times 10^{-4}$
- $\phi$  - (Phi) - Función de ....; también se ha utilizado para indicar el tamaño de los diámetros en las diferentes secciones del sistema (fig. 3)

### SUBINDICES

- $c$  - En el término  $H_{fc}$  significa contracción
- $e$  - En el término  $H_{fe}$  significa expansión
- $f$  - En los términos  $H_f$ ,  $H_{fe}$ ,  $H_{fc}$  significa fricción
- $o$  - En  $D_o$ ,  $u_o$ ,  $Q_o$ , ... etc. significa orificio

### ABREVIACIONES

- cp - centipoises para viscosidad absoluta
- D.I - Diámetro interno del tubo
- D.E.- Diámetro externo del tubo
- gal - galones en flujo volumétrico
- Hg - mercurio



H.P. - Horsepower para indicar potencia de la bomba

hr - hora

lbm - libras- masa, utilizado para flujo másico, densidad y viscosidad del agua

lbf - libras- fuerza, unidad de fuerza

min - minuto, fracción de una hora

pag - página

pulg- pulgadas

seg - segundo(s)

vrs - versus

## BIBLIOGRAFIA

1. Bird, Stewart and Lightfoot "Transport Phenomena" pág. 208-220, 224-226, John Wiley and Sons, New York 1960.
2. Brown, G. G. and Associates "Unit Operation" pags. 131-142, 154-161, 177-186; John Wiley and Sons, Inc. New York 1964.
3. Coulson, J. M. and Richardson "Chemical Engineering" vol, I, pág. 27-34, 41-72, 100-120. Revised 2nd Edition The Mc Millan Company, New York 1964.
4. Dodge, B. F. "Chemical Engineering Thermodynamics", pags. 308-322, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1944.
5. Foust, A. S., Wenzel, et. al "Principles of Unit Operations", pags. 391-408 John Wiley and Sons 1964.
6. Hougen-Watson and Ragatz "Chemical Process Principles" Parte II, "Thermodynamics" pags. 678-686, John Wiley and Sons, New York 1965.
7. Johnstone and Shring "Pilots Plants, Model and Scale-up Methods-in Chemical Engineering" pgs. 112-123 Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1957.
8. Mc Adams, W. H. "Heat Transmission" pag. 140-160, 3rd edition Mc Graw-Hill Book Company, New York 1954.
9. Mc Cabe, W. L. and Smith J. C. "Unit Operations of Chemical Engineering" pags. 35-34, 98-115, 136-141, 162-173, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1956.
10. Mickley, Sherwood and Reed "Applied Mathematics in Chemical Engineering" pags. 56-59. Mc Graw Hill Book Company, Inc. New York 1957.
11. Perry, J. H. "Chemical Engineering Handbook" Section 5; pag. 5-2-19, 5-30-34. 4th edition. Mc Graw-Hill Book Company, New York 1963.
12. Rhodes T. J. "Industrial Instruments for Measurement and Control" pags. 186-228. Mc Graw-Hill Book Company, New York 1941.
13. Sabersky R. H. and Acosta A. J. "Fluid Flow, a first course in Fluid Mechanics" pag. 148-153. The Mc Millan Company, New York, 1964.
14. Smith and Van Ness "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics" pag. 238-253. Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York 1959.

15. Giles, "Theory and Problems of Fluid Mechanics and Hydraulics" pags. 70-74, 96-100, 133-145, Shaum's Publishing Company, New York.
16. Vilbrandt and Dryden "Chemical Engineering Plant Design", pags. 70-71 Mc Graw-Hill Book Company. New York, 1949.
17. Weber H. C. and Meissner H. P. "Thermodynamics for Chemical Engineers", pag. 200-214, 221-230; John Wiley and Sons, New York, 1957.
18. Zimmerman and Lavine, "Chemical Engineering Laboratory Equipment", pags. 1-25, 2nd. Edition, Service Publishers Co. New York, 1955.

R E F E R E N C I A S .

- a) "Manual of Process Engineering Calculations and Shortcuts, pags. 21, 30, 44, 53, 84-85; Chemical Engineering, Mc Graw-Hill Publishing Co., Inc., New York 1947.
- b) "Straight line chart for orifice meter calibration" Chemical Engineering 72 September 27, 1965.
- c) "Data sheet Eases Specifications of Pumps", Chemical Engineering 62 (1955) pag. 170.
- d) "Flow of Fluids: A Chemical Engineering Report," Chemical Engineering 56 No. 5 (1949) pags. 96 y sigs.