



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESTUDIO Y ARRANQUE DE UN EQUIPO PARA REALIZAR  
PRÁCTICAS DE BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA.

TRABAJO RECEPCIONAL

Que para obtener el título de:

Ingeniero Químico

Presenta

Alma Delia Montante Montelongo

Asesor: I. Q. Ma. Guadalupe Ruiz Castillo

San Luis Potosí, S. L. P., 1993



01

T

QA901

M6

C.1

10 800 75 344

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



ESTUDIO Y ARRANQUE DE UN EQUIPO PARA REALIZAR  
PRÁCTICAS DE BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA.

TRABAJO RECEPTORIAL

Que para obtener el título de:

Ingeniero Químico

Presenta

Alma Delia Montante Montelongo

Asesora: I. Q. Ma. Guadalupe Ruiz Castillo

San Luis Potosí, S. L. P., 1993



1001  
1910

A la memoria

Ing. Ma. Guadalupe Díaz Peña

Por su confianza y apoyo en el desarrollo de los trabajos de esta oficina.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura

que colaboraron en el desarrollo de esta obra.

1910

1910



T  
QA 901  
M6



1080075344



## AGRADECIMIENTOS

A mi asesora:

Ing. Ma. Guadalupe Ruiz Castillo.

Por su confianza y apoyo, además de su asesoría para la realización de este trabajo.

A los profesores de laboratorio de Ingeniería Química.

A todas las personas que de alguna manera hicieron posible este trabajo.

Alma Delia

# DEDICATORIA

Con cariño a mis padres:

Ma. de los Angeles Montelongo Rodriguez  
Gerardo Montante Dimas

A la memoria de mi hermana:

Laura Araceli

A mis hermanas:

Veronica  
Ma. de los Angeles

A mis amigos, en especial:

Ma. Teresa  
Victor Hugo  
Jorge Alberto

Alma Delia



# INDICE TEMATICO

|  | PAGINA |
|--|--------|
| INTRODUCCION.....  | 1      |
| CAPITULO 1.- CONSIDERACIONES TEORICAS.....                                   | 3      |
| A.- FLUIDOS EN EQUILIBRIO (ESTATICA DE FLUIDOS).....                         | 3      |
| A.1 VARIACION DE LA PRESION EN UN FLUIDO DEBIDO A LA<br>POSICION.....        | 4      |
| A.2 EQUILIBRIO DE UN FLUIDO DE DENSIDAD CONSTANTE.....                       | 6      |
| A.3 MEDICION DE LA PRESION .....   | 8      |
| A.3.1 MANOMETROS.....  | 9      |
| B.- PRINCIPIOS DEL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS.....                            | 14     |
| B.1 VARIACION DE LOS PARAMETROS DEL FLUJO EN EL TIEMPO Y<br>EL ESPACIO.....  | 14     |
| B.2 DESCRIPCION DEL PATRON DE FLUJO.....                                     | 17     |
| B.3 ACELERACION DE UN PARTICULA DE FLUIDO.....                               | 18     |
| B.4 CONTINUIDAD.....   | 19     |
| B.5 ECUACION DE BERNOULLI.....   | 23     |
| B.5.2 SIGNIFICADO FISICO DE LOS TERMINOS DE LA ECUACION<br>DE BERNOULLI..... | 23     |
| B.5.3 CORRECCION DEBIDA A LOS EFECTOS DE SUPERFICIES<br>SOLIDAS.....         | 24     |
| B.5.4 CORRECCION DEBIDA A LA ENERGIA CINETICA DE LA<br>CORRIENTE.....        | 24     |
| B.5.5 CORRECCION DEBIDA A LA FRICCIÓN DEL FLUIDO.....                        | 26     |
| CAPITULO 2.- CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....                                    | 28     |
| 2.1 CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....   | 28     |
| 2.2 PRACTICA PROPUESTA.....  | 30     |

|              |                           |    |
|--------------|---------------------------|----|
| CAPITULO 3.- | CALCULOS.....             | 41 |
| 3.1          | CALCULOS.....             | 41 |
| 3.2          | TABLAS DE RESULTADOS..... | 51 |
| <br>         |                           |    |
| CAPITULO 4.- | CONCLUSIONES.....         | 67 |
| <br>         |                           |    |
| APENDICES    |                           |    |
| A.           | PROGRAMA.....             | 68 |
| B.           | BIBLIOGRAFIA.....         | 72 |

## INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como objetivo, proveer a los alumnos de la materia de Operaciones de Cantidad de Movimiento de un equipo sencillo pero didáctico, que los ayude a comprobar fácilmente los principios en que se fundamentan la ecuación de Balance de Energía Mecánica (generalmente conocida como ecuación de Bernoulli) y las ecuaciones de Estática de Fluidos.

La construcción e instalación del equipo, se hizo utilizando partes de otros equipos ya instalados en el laboratorio, esto con el fin de aprovechar al máximo los recursos existentes. Así, se usaron el tanque de alimentación, la línea de alimentación y el rotámetro del equipo de Caída de Presión en Tubería Recta y el tanque receptor y la descarga al drenaje del equipo de Sistema de Bombas. Por lo anterior se entiende que el equipo se instaló en un espacio físico que es común a ambos equipos.

La primera parte de este trabajo fue la construcción del equipo, debido a que se tenía que aprovechar un espacio existente y por la simplicidad del mismo.

Una vez construido e instalado se procedió a realizar pruebas experimentales y a diseñar prácticas que posteriormente correrán los alumnos.

Se hizo también un programa para simular la práctica con fluidos diferentes al agua y en posiciones inclinadas de la tubería, es decir a distinto ángulo al de  $90^\circ$  y  $0^\circ$  además de estas, que son a las que comúnmente se trabajará.

El capítulo 1 trata de los conceptos teóricos en los que se

fundamentan los cálculos que se presentan en el capítulo 3. El capítulo 2 muestra la práctica propuesta y descripción del equipo; y en el capítulo 4 las conclusiones. Los apéndice A y B contienen el programa y la bibliografía consultada.

# CAPITULO 1. CONSIDERACIONES TEORICAS

## A. FLUIDOS EN EQUILIBRIO (ESTATICA DE FLUIDOS)

La estática de los fluidos es la rama de la mecánica de los fluidos que estudia principalmente los fluidos en reposo. Como los elementos individuales del fluido no se mueven unos con respecto a otros, no existen fuerzas de corte, y todas las fuerzas debidas a la presión del fluido son normales con respecto a las superficies sobre las cuales actúan. Al no existir movimiento relativo entre los elementos, puede hacerse caso omiso de la viscosidad del fluido. La estática de los fluidos puede hacerse extensiva para cubrir casos en los cuales los elementos del fluido no se mueven unos con relación a otros, aún cuando el fluido, como un conjunto esté en movimiento.

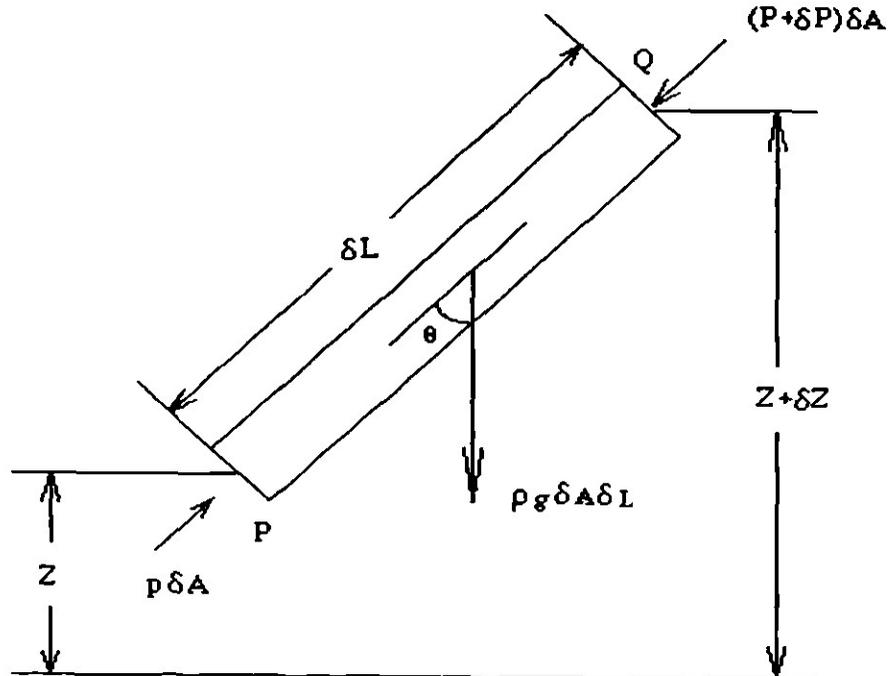


FIG. 1.1. CILINDRO DE FLUIDO.

## A.1 VARIACION DE LA PRESION EN UN FLUIDO, DEBIDA A LA POSICION.

Considerando un pequeño cilindro de fluido como el ilustrado en la fig. 1.1. Si el fluido se encuentra en reposo, el cilindro deberá estar en equilibrio y las únicas fuerzas que actúan sobre el mismo son las que actúan sobre sus varias caras (debido a la presión), y la gravedad.

Como el área de sección transversal  $\delta A$  es muy pequeña la variación de presión sobre ésta es despreciable. Si  $p$  es la presión en el extremo P, y  $p + \delta p$  la presión en el extremo Q donde  $\delta p$  puede ser positiva o negativa. Por lo anterior, la fuerza sobre el extremo P es  $p\delta A$ , y la fuerza sobre el extremo Q es  $(p + \delta p)\delta A$ . Si la longitud del cilindro es  $\delta L$ , su volumen es  $\delta A \delta L$  y su peso  $\rho g \delta A \delta L$ , en donde  $\rho$  representa la densidad y  $g$  el peso por unidad de masa. Ya que no existen fuerzas de corte en un fluido en reposo, las únicas fuerzas que actúan sobre los lados del cilindro son perpendiculares a éstos, por lo tanto, no tienen componente a lo largo del eje.

Realizando la suma algebraica de fuerzas en dirección QP:

$$(p + \delta p) \delta A - p \delta A + \rho g \delta A \delta L \cos \theta = 0 \quad (1.1)$$

Ahora, si P se encuentra en una altura  $z$  arriba de cualquier plano horizontal de referencia adecuado, y Q se encuentra a una altura  $z + \delta z$ , entonces la diferencia vertical de nivel entre los extremos del cilindro es  $\delta z$  y  $\delta l \cos \theta = \delta z$  por lo tanto la ecuación 1.1 se simplifica a:

$$\delta p + \rho g \delta z = 0 \quad (1.2)$$

y en el limite, cuando  $\delta z \rightarrow 0$

$$\frac{\delta p}{\delta z} = -\rho g \quad (1.3)$$

El signo negativo indica que la presión disminuye en la dirección en la cual  $z$  aumenta. Si  $P$  y  $Q$  se encuentran en el mismo plano horizontal, entonces  $\delta z = 0$ , y  $\delta p = 0$ , cualquiera que sea el valor de  $\rho$ . Entonces, en cualquier fluido en equilibrio, en dos puntos cualesquiera situados en un mismo plano horizontal, la presión es la misma.

Es decir, una superficie de presión igual (una superficie isobárica) constituye un plano horizontal. Si en todos los puntos de cierto plano horizontal existe una presión  $p$ , en otro plano horizontal también contenido un fluido y que se encuentra a una distancia  $\delta z$  sobre el anterior, la presión valdrá  $p + (\delta p / \delta z) \delta z$ . Como esta presión debe también ser constante a través de un plano horizontal,  $\delta p / \delta z$  no puede variar horizontalmente y, por lo tanto, según la Ec. 1.3,  $\rho g$  tampoco varía horizontalmente.

Pero el resultado nos dice que una condición para el equilibrio de cualquier fluido, es que, tanto la densidad como la presión, deben ser constantes a través de un plano horizontal.

Existen entonces, tres condiciones para el equilibrio de cualquier fluido:

1. La presión sobre cualquier plano horizontal, debe ser la misma.
2. La densidad sobre cualquier plano horizontal, debe ser la misma.
3.  $dp/dz = -\rho g$ . (Puesto que la presión sólo varía en la dirección vertical ( $z$ ), la derivada parcial de la Ec. 1.3 puede dar lugar a la derivada total.)

Para determinar la presión en cualquier punto de un fluido en equilibrio debe integrarse la ecuación 1.3.:

$$p = \int -\rho g dz \quad (1.4)$$

sin embargo no es posible la evaluación de la integral, a menos que se conozca la variación de  $\rho$  debida a  $z$

## A.2 EQUILIBRIO DE UN FLUIDO DE DENSIDAD CONSTANTE

Para un fluido de densidad constante la integración de la Ec. 1.2, da:

$$p + \rho gz = \text{constante} \quad (1.5)$$

Este resultado es válido a través de una extensión continua del mismo fluido, además de ser despreciable la variación de  $g$ . Si el fluido es un líquido que tiene una superficie libre sobre la cual actúa la presión atmosférica ( $P_a$ ), esta superficie libre se puede tomar como nivel de referencia  $z = 0$ . Para que una superficie esté en equilibrio, la presión inmediatamente debajo de la misma debe ser igual a la que actúa por encima.

Para un punto que se encuentra a una profundidad  $h$  a partir de la superficie,  $h = -z$  (puesto que  $h$  se mide hacia abajo, en tanto que  $z$  se mide hacia arriba) y, de la Ec. 1.5.

$$p = p_a + \rho gh \quad (1.6)$$

Por lo tanto, la presión aumenta en forma lineal con respecto a la profundidad, sin importar la forma del recipiente.

Así, la presión atmosférica actúa por lo general, aunque en forma indirecta, sobre todas las superficies, y es esencialmente constante para las diferencias de elevación por lo común encontradas. Por lo anterior, es con frecuencia sencillo considerar la presión atmosférica como el cero de la escala de presiones. Una presión expresada por arriba de la presión atmosférica y considerando a ésta como cero, se conoce con el nombre de presión manométrica. La ecuación 1.6 se

reduce entonces a  $p = \rho g z$ . Esto es, la presión manométrica en un punto cualquiera de un líquido que se encuentra en equilibrio, es igual al producto del peso específico  $\rho g$  y de la profundidad a la que ese punto se encuentra a partir de la superficie libre que está en contacto con la atmósfera, medida verticalmente

La proporcionalidad directa existente entre la presión de medidor y  $h$ , para un fluido de densidad constante, permite visualizar en forma muy simple a la presión en términos de la distancia vertical  $h = p/\rho g$ . El cociente  $p/\rho g$  se denomina la carga de presión que corresponde a  $p$ .

Para un líquido sin superficie libre, por ejemplo, el contenido en un tubo cerrado,  $p/\rho g$  corresponde a la altura sobre el tubo a la que ascendería una superficie libre si se conectara a un tubo otro tubo pequeño de longitud suficiente y abierto a la atmósfera. -conocido como tubo piezométrico (Fig. 1.2).

La Ec. 1.5 se puede dividir entre  $\rho g$  para dar  $(p/\rho g) + z = \text{cte}$ . Esta constante se conoce con el nombre de carga piezométrica, y corresponde a la altura de la superficie libre sobre el plano de referencia. La cantidad  $p + \rho g z$  se denomina presión piezométrica.

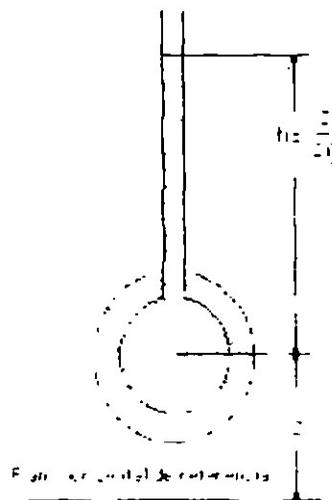


FIG. 1.2 TUBO PIEZOMETRICO

### A.3 LA MEDICION DE LA PRESION

En la práctica, la presión se mide por medio de la determinación de una diferencia de presión. Si la diferencia es la existente entre la presión del fluido en estudio y la de vacío, entonces se conoce el resultado como la presión absoluta del fluido. Sin embargo, en forma más general, la diferencia que se determina es la existente entre la presión del fluido estudiado y la presión atmosférica, conocida como presión de medidor. Si la presión del fluido se encuentra por debajo de la atmosférica, se denomina vacío o succión (véase la fig. 1.3). (El termino "alto vacío" se refiere a un valor bajo de la presión absoluta). La presión absoluta siempre es positiva, pero las presiones manométricas son positivas si son mayores que la atmosférica y negativas si son menores que la atmosférica.

Las propiedades de un gas son en su mayoría funciones de la presión absoluta.

Con frecuencia la presión medida es la de medidor y debe sumarse a ésta la presión atmosférica para obtener el valor de la presión absoluta.

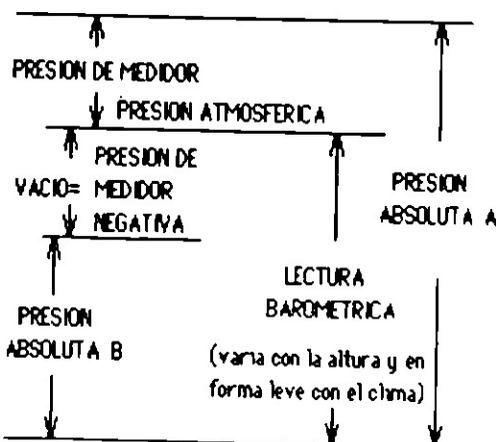


FIG. 1.3

Por otro lado, las propiedades de los líquidos se afectan poco por la presión y, por tanto, la presión de éstos se expresa por lo general como un valor de medidor.

La presión absoluta de un líquido puede ser de importancia cuando éste se encuentra en el punto de vaporización.

### A.3.1 MANOMETROS

Los manómetros son dispositivos importantes para medir la diferencia de presión, entre un cierto punto y la atmósfera, o entre dos puntos, ninguno de los cuales se encuentra necesariamente a presión atmosférica.

Un tipo común de manómetro es el que emplea un "tubo U" como se muestra en la Fig. 1.4.

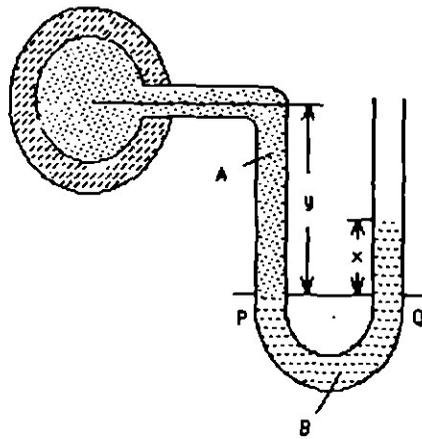


FIG. 1.4 MANOMETRO DE "TUBO U".

La parte inferior del "tubo U" contiene un líquido (B) inmisible con el A, y de mayor densidad. Dentro de una extensión continua del

mismo fluido, la presión es la misma en dos puntos cualesquiera de un plano horizontal, cuando se establece el equilibrio. Por lo anterior, ya que los puntos P y Q están unidos por una extensión continua del líquido B, las presiones en P y Q son iguales cuando el sistema está en equilibrio.

Supóngase que la presión en el centro del tubo es  $p$ . Entonces, provisto que el fluido A es de densidad constante, la presión en P es  $p + \rho_A gy$  (de la Ec. 1.5), en donde  $\rho_A$  representa la densidad del fluido A. Si el otro lado del "tubo U" está abierto a la atmósfera, la presión (de medidor) en Q es  $\rho_B gx$ , en donde  $\rho_B$  representa la densidad del líquido B.

$$p + \rho_A gy = \rho_B gx \quad (1.7)$$

Si A es un gas,  $\rho_A$  es despreciable en comparación con  $\rho_B$  y entonces  $p = \rho_B gx$ .

Los manómetros de tubo en "U" se usan también para medir la diferencia entre dos presiones desconocidas, por ejemplo a y b. La Fig. 1.5 muestra una disposición como la mencionada, para medir la diferencia de presión en un cambio de diámetro de tubería la cuál está colocada en posición horizontal.

Donde a y b son las tomas de presión a lo largo del tubo, c y d son las diferentes alturas que toma el líquido más denso (mercurio)  $Z_1$  y  $Z_2$  las alturas correspondientes a la toma de presión y cambio de líquido.

Por lo que realizando una suma de fuerzas para obtener la diferencia de presiones

$$P_c = P_a + g (Z_1 + Z_2) \rho_{H_2O} \quad (1.8)$$

$$P_c = P_b + g Z_1 \rho_{H_2O} + g Z_2 \rho_{Hg} \quad (1.9)$$

Igualando las ecuaciones 1.8 y 1.9:

$$P_a + g (Z_1 + Z_2) \rho_{H_2O} = P_b + g Z_1 \rho_{H_2O} + g Z_2 \rho_{Hg}$$

Despejando la diferencia de presiones:

$$P_a - P_b = g Z_1 \rho_{H_2O} + g Z_2 \rho_{Hg} - g Z_1 \rho_{H_2O} - g Z_2 \rho_{H_2O}$$

Eliminando términos:

$$P_a - P_b = g Z_2 \rho_{Hg} - g Z_2 \rho_{H_2O}$$

$$\Delta P = g Z_2 (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) \quad (1.10)$$

Donde:

$$P_a - P_b = g (Z_2 - Z_1) \rho_{Hg} \quad (1.11)$$

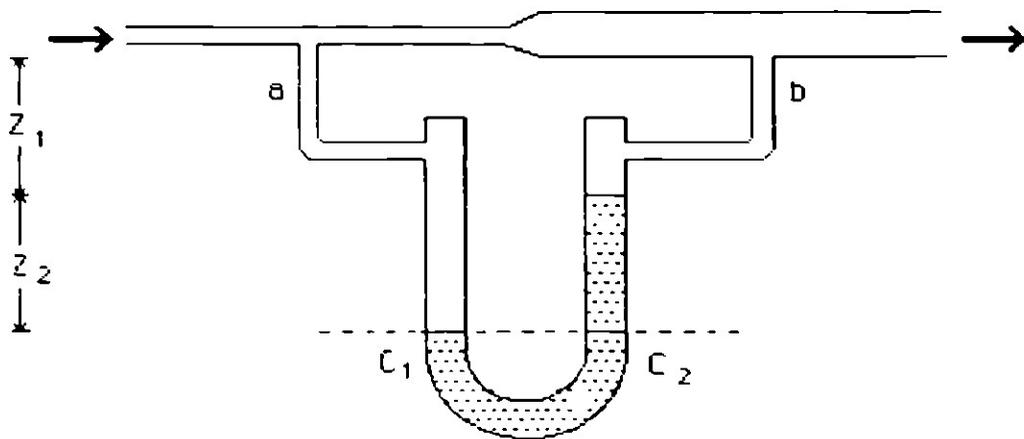


FIG. 1.5 MEDICION DE DIFERENCIA DE PRESION EN UN CAMBIO DE DIAMETRO DE TUBERIA EN POSICION HORIZONTAL.

Ahora consideremos el mismo manómetro de tubo en "U" pero realizando una medición en una tubería colocada en posición vertical como se muestra en la Fig. 1.6. Para obtener la diferencia de presión se realiza lo siguiente:

$$P_c = P_a - g Z_1 \rho_{H_2O} \quad (1.12)$$

$$P_c = P_b + g Z_2 \rho_{H_2O} + g \Delta Z \rho_{Hg} \quad (1.13)$$

Igualando ecuaciones

$$P_a - g Z_1 \rho_{H_2O} = P_b + g Z_2 \rho_{H_2O} + g \Delta Z \rho_{Hg}$$

Despejando la diferencia de presión:

$$P_a - P_b = g Z_2 \rho_{H_2O} + g \Delta Z \rho_{Hg} + g Z_1 \rho_{H_2O}$$

$$P_a - P_b = g \rho_{H_2O} (Z_2 + Z_1) + g \Delta Z \rho_{Hg} \quad (1.14)$$

Donde:

$$\Delta P = g \rho_{H_2O} (Z_2 + Z_1) + g \Delta Z \rho_{Hg} \quad (1.15)$$

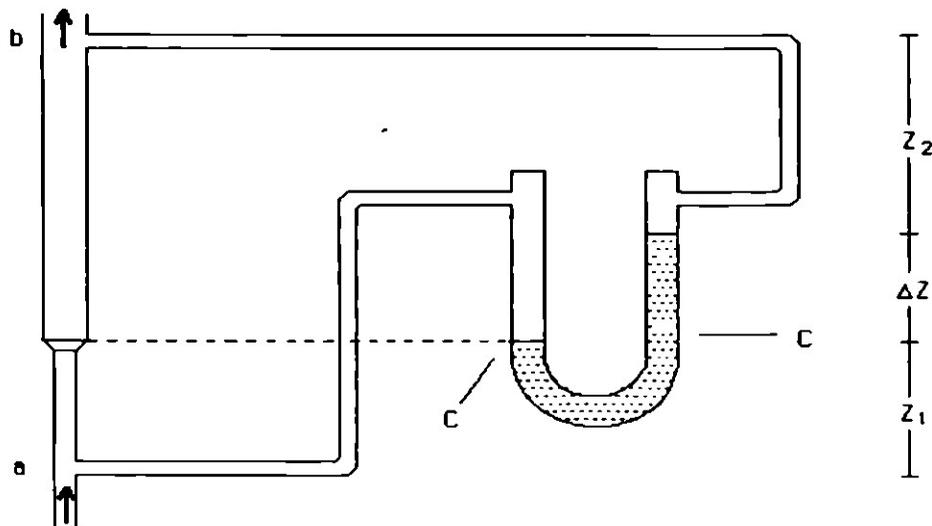


FIG. 1.6 MEDICION MANOMETRICA EN POSICION VERTICAL.

El tubo inclinado como el que se muestra en la Fig. 1.7, es similar al tubo en "U", con la diferencia de que uno de los ramales está inclinado y tiene el extremo de gran diámetro y en forma de pozo, el cual aumenta la exactitud de la lectura.

Este tipo de indicador es para presiones muy bajas o caídas de presiones también muy pequeñas. En este último caso, la diferencia de presiones viene dada por la expresión:

$$P = R_1 (\rho_m - \rho_p) (\text{sen } \alpha) g \quad (1.16)$$

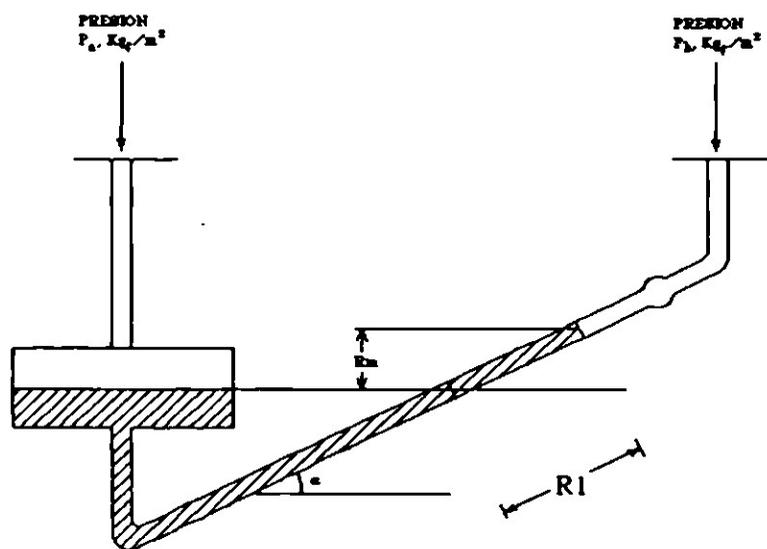


FIG. 1.7 MANOMETRO DE RAMA INCLINADA.

## B. PRINCIPIOS DEL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS

El análisis matemático de los problemas de flujo de fluidos sólo es posible, por lo general, si se hacen ciertas suposiciones simplificadoras, ya que dicho flujo es muy complejo. Una de las suposiciones principales, es la de que el fluido es un fluido ideal carente de viscosidad. En situaciones en las que el efecto de la viscosidad es pequeño, esta suposición proporciona con frecuencia resultados de precisión aceptable.

Las suposiciones anteriores son debido a que la definición de un sistema de flujo abierto bajo las condiciones del estado estable requiere que:

1. El fluido que fluye al sistema, sea uniforme en cuanto a propiedades y a velocidad, y que éstas sean invariantes con el tiempo.
2. El fluido que sale del sistema, sea uniforme en cuanto a propiedades y velocidad, y que éstas sean invariantes con el tiempo. Las condiciones de salida no serán forzosamente idénticas a las de entrada.
3. Las propiedades físicas del fluido en cualquier punto dentro del sistema son constantes con respecto al tiempo.
4. La cantidad de masa que entra y sale del sistema es constante.
5. El calor añadido y el trabajo dado son constantes.

### B.1 VARIACION DE LOS PARAMETROS DEL FLUJO EN EL TIEMPO Y EN EL ESPACIO.

En general, los parámetros que describen el comportamiento de un fluido, tales como la velocidad, la presión y la densidad, no son constantes. Estos parámetros pueden variar de un punto a otro, o de un instante de tiempo a otro.

El *Flujo permanente*, es aquel en que los varios parámetros en

cualquier punto, no cambian con el tiempo. El *Flujo no permanente o inconstante* en el cual ocurren cambios con el transcurso del tiempo. Muchos problemas se pueden estudiar con efectividad suponiendo que el flujo es permanente.

Si en un instante particular, las diferentes cantidades no cambian de un punto a otro a través de una región especificada, el flujo es *uniforme* a través de esa región. Si ocurre algún cambio de un punto a otro, entonces el flujo es *no uniforme*. Esta clase de no uniformidad se encuentra siempre cerca de los límites sólidos a lo largo de los cuales fluye el fluido. Lo anterior se debe a que todos los fluidos poseen viscosidad, la que reduce a cero la velocidad relativa en un límite sólido.

La permanencia de flujo y la uniformidad de flujo no necesariamente van juntas. Son posibles cuatro combinaciones:

TABLA 1.1

| TIPO                                 | EJEMPLO   |
|--------------------------------------|---|
| 1. Flujo permanente uniforme         | Flujo bajo régimen constante a través de un tubo recto, de sección transversal constante. (no se considera la región cercana a las paredes del tubo).   |
| 2. Flujo permanente no uniforme      | Flujo bajo un régimen constante a través de un tubo cónico.   |
| 3. Flujo no permanente uniforme      | Flujo acelerado o desacelerado a través de un tubo recto, de sección transversal constante. (no se considera la región cercana a las paredes del tubo). |
| 4. Flujo no permanente, no uniforme. | Flujo acelerado o desacelerado a través de un tubo cónico   |

## B.2 DESCRIPCION DEL PATRON DEL FLUJO

Para un instante particular de tiempo, se puede considerar en el flujo una curva imaginaria a través de la cual, en ese instante, no fluye fluido. Una línea como la descrita se denomina una línea de corriente. Si en un instante particular se considera un número de líneas de corriente, el patrón que forman éstas proporciona una buena indicación del flujo entonces ocurrente. El patrón no cambia para el flujo permanente, pero para el flujo no permanente, cambia con el tiempo.

Si el flujo es continuo, cada línea de corriente debe ser una línea continua que, o se extiende hasta el infinito tanto corriente arriba como corriente abajo, o forma una curva cerrada.

Es posible imaginar un haz de líneas de corriente vecinas que formen un pasaje a través del cual fluye el fluido (fig. 1.8), y este pasaje (no necesariamente circular) se conoce como *tubo de corriente*.

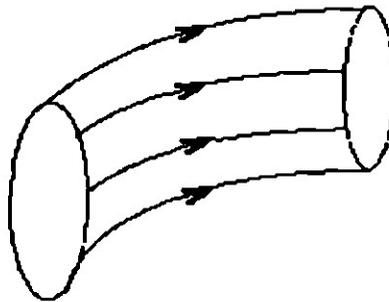


FIG. 1.8 TUBO DE CORRIENTE.

Una partícula individual de fluido, no necesariamente sigue una línea de corriente, pero describe una *trayectoria*. A diferencia de una línea de corriente, una trayectoria se puede semejar, a una

exposición de tiempo que muestra la dirección tomada por la misma partícula en instantes sucesivos de tiempo.

Una línea de estriación o línea de filamento proporciona una imagen instantánea de las posiciones de todas las partículas.

Para un flujo dado, difieren los patrones de las líneas de corriente, de las líneas de trayectoria y de las líneas de estriación; excepto para unos pocos casos especiales, los tres patrones sólo coinciden para el flujo permanente.

### B.3 ACELERACION DE UNA PARTICULA DE FLUIDO

En general, la velocidad de una partícula de fluido es función de la posición y del tiempo. Al moverse la partícula, por ejemplo, del punto A al punto B, su velocidad cambia por dos razones. Una es que las partículas en B tienen una velocidad diferente de la de las partículas en A, aun en el mismo instante; la otra razón es que, durante el tiempo en el que la partícula se mueve desde A hasta B, cambia la velocidad en B. Si B se encuentra a sólo una corta distancia a partir de A, el aumento debido a su cambio de posición y del aumento debido al paso de un intervalo de tiempo  $\delta t$ .

$$\delta v = \frac{\partial v}{\partial L} \delta L + \frac{\partial v}{\partial t} \delta t$$

y así en el límite, cuando  $\delta t \rightarrow 0$ , la aceleración  $a$ , en la dirección de flujo se da por :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial L} \frac{dL}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

o, ya que  $ds/dt = v$ ,

$$a = \frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial L} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.17)$$

El régimen total de aumento  $dv/dt$  para una partícula dada, se denomina muchas veces aceleración sustancial. El término  $\partial v/\partial t$  representa sólo la aceleración local o temporal. El término  $v(\partial v/\partial L)$  se conoce como la aceleración convectiva, esto es, el régimen de aumento de velocidad debido al cambio de posición de la partícula. En el flujo permanente  $\partial v/\partial t$  vale cero.

#### B.4 CONTINUIDAD

La ecuación de la continuidad es en realidad, una forma de expresión matemática del principio de la conservación de la masa. Para considerar su expresión más general, hágase referencia a la fig. 1.9. En ésta se pone bajo observación cualquier región fija dentro del fluido y puesto que, en ausencia de reacción nuclear no se crea ni se destruye materia, dentro de esta región.

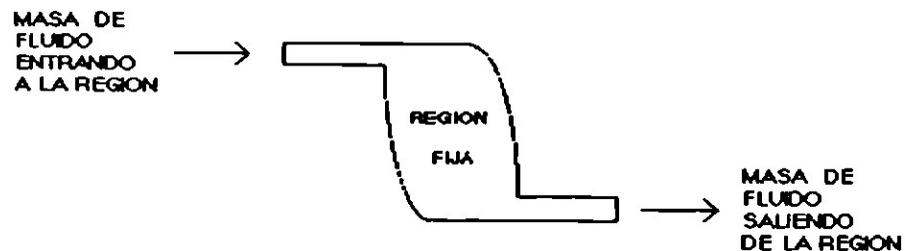


FIG. 1.9 REGION FIJA DENTRO DE UN FLUIDO.

El régimen bajo el cual, entra a la región es igual al régimen bajo el cual la masa deja la región más el régimen de acumulación de masa en la región.

Si el flujo es permanente, el régimen bajo el cual se acumula la

masa dentro de la región vale cero. Entonces: el régimen bajo el cual la masa entra a la región es igual al régimen bajo el cual la masa deja la región.

## B.5 ECUACION DE BERNOULLI. BALANCE DE ENERGIA MECANICA

La ecuación de Bernoulli fué formulada aproximadamente un siglo antes del desarrollo de la Primera Ley de la Termodinámica, y es un caso particular del balance de energía mecánica; es aplicada a fluidos viscosos, incompresibles, en los que no se intercambia trabajo de eje con los alrededores. Para un fluido no viscoso, las pérdidas por fricción son cero.

La ecuación de Bernoulli sin fricción puede deducirse aplicando la Segunda Ley de Newton al flujo potencial de un fluido. La ecuación que se encuentra así, es una forma especial del balance de energía, en la cual solo aparecen términos de energía mecánica.

La aplicación de la Segunda Ley de Newton se hará a una partícula de fluido. Consiste de un pequeño elemento del fluido, sobre el cual son muy pequeños los cambios de velocidad y presión. Dicho elemento se selecciona de manera que ocupe parte de un tubo de corriente de pequeña sección transversal (véase fig. 1.10). Los extremos del elemento son planos y perpendiculares a la línea central de corriente, pero éstos pueden ser de cualquier forma geométrica.

Las fuerzas bajo investigación, son aquellas debidas a la presión del fluido a todo alrededor del elemento y a la gravedad. Se supone que otras fuerzas, tales como las debidas a la viscosidad, tensión superficial, electricidad, magnetismo, reacciones químicas o nucleares, son tan pequeñas que se pueden despreciar. El comportamiento de un fluido real es a menudo notablemente similar al de un fluido ideal inviscido.

En ausencia de fuerzas cortantes, cualquier fuerza que actúa sobre una superficie es perpendicular a ésta, ya sea que la superficie sea la de un límite sólido, o la de un elemento adyacente de fluido.

El elemento tiene una longitud  $\delta L$ , en donde  $L$  representa la distancia medida a lo largo del tubo de corriente, en la dirección del flujo. La longitud  $\delta L$  es tan pequeña, que se puede despreciar la curvatura de las líneas de corriente a través de esta distancia.

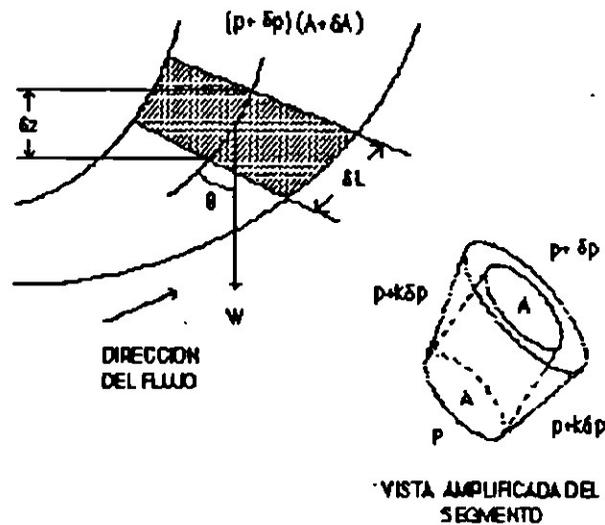


FIG. 1.10 ELEMENTO DE FLUIDO

La presión, velocidad y demás, variarán de acuerdo con  $L$ , pero ya que el flujo es permanente, las cantidades no cambian con el tiempo en un punto particular.

En el extremo de corriente arriba del elemento, la presión es  $p$ , y en el extremo de corriente abajo es  $p + \delta p$  (en donde, por supuesto,  $\delta p$  puede ser negativa). A los lados del elemento, la presión varía según la longitud, pero se puede suponer un valor promedio de  $p + k\delta p$ , en donde  $k$  es una fracción menor que la unidad. La presión en el

extremo de corriente arriba (en donde el área de sección transversal es  $A$ ) resulta en una fuerza  $pA$  sobre el elemento, en la dirección de flujo; la presión en el extremo de corriente abajo (en donde el área de sección transversal es  $A + \delta A$ ) ocasiona una fuerza  $(p + \delta p)(A + \delta A)$  sobre el elemento, en la dirección opuesta.

Las fuerzas debidas a la presión en los lados del elemento, tienen también una componente en la dirección del flujo. Ya que la fuerza en cualquier dirección se da por el producto de la presión y el área proyectada perpendicular a esa dirección, la fuerza axial neta corriente abajo debida a la presión a los lados del elemento es  $(P + k\delta p)\delta A$ , ya que  $\delta A$  es el área neta perpendicular a la dirección de flujo.

El peso del elemento  $W$ , es igual a  $\rho g A \delta L$ , y su componente en la dirección de movimiento es  $-\rho g A \delta L \cos \theta$ , en donde  $\rho$  representa la densidad del fluido y  $\theta$  el ángulo entre la vertical y la dirección de movimiento. Por tanto, en ausencia de otras fuerzas, tales como las debidas a la viscosidad, la fuerza total que actúa sobre el elemento, en la dirección de flujo, es:

$$pA - (p + \delta p)(A + \delta A) + (p + k\delta p) \delta A - \rho g A \delta L \cos \theta$$

Cuando se desprecia el segundo orden de las cantidades pequeñas, esto se reduce a:

$$-\delta p - \rho g A \delta L \cos \theta \quad (1.18)$$

Ya que la masa del elemento es constante, la fuerza neta en dirección de la aceleración es igual a,  $\rho A \delta L (dv/dt)$ .

Se puede expresar  $\delta L \cos \theta$  como  $\delta z$ , en la que  $z$  representa la altura por sobre algún plano horizontal de referencia conveniente, y  $\delta z$  el cambio de nivel desde un extremo del elemento al otro.

Entonces:

$$-A\delta p - \rho g A \delta z = \rho A \delta L \frac{dv}{dt}$$

Dividiendo por  $\rho A \delta L$  y tomando el límite  $\delta L \rightarrow 0$  se obtiene:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dL} + \frac{dv}{dt} + g \frac{dz}{dL} = 0 \quad (1.19)$$

De la ecuación 1.17

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial L} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

pero para el flujo permanente la aceleración local  $\partial v / \partial t = 0$  y así  $dv/dt = v(dv/ds)$  (tomando ahora la diferencial total en lugar de la parcial, porque  $v$  es una función de  $L$  sólo para este tubo de corriente). Se tiene entonces:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dL} + v \frac{dv}{dL} + g \frac{dz}{dL} = 0 \quad (1.20)$$

Con frecuencia se hace referencia a la ecuación 1.20 como la ecuación de Euler. Esta ecuación no se puede integrar completamente con respecto a  $L$  a menos que  $\rho$  sea una constante o una función conocida de  $p$ . Sin embargo, para un fluido de densidad constante, el resultado de la integración es:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (1.21)$$

siendo  $Z$  la altura por encima de un plano arbitrario de referencia. Entre dos puntos determinados sobre la línea de corriente la ec. 1.21 puede escribirse así:

$$\frac{p_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} + gZ_a = \frac{p_b}{\rho} + \frac{v_b^2}{2} + gZ_b \quad (1.22)$$

La ecuación 1.22 se conoce como la *ECUACION DE BERNOULLI*. Los subíndices  $a$  y  $b$  corresponden a los puntos de entrada y salida respectivamente.

## B.5.1 INTERPRETACION DE LA ECUACION DE BERNOULLI

La ec. 1.22 es de gran utilidad para el tratamiento de flujo de fluidos no compresibles. La ecuación establece que, en ausencia de fricción, cuando la velocidad  $v$  disminuye, bien la altura  $Z$  o la presión  $p$ , o ambas a la vez, tienen que aumentar. Si la velocidad aumenta, sólo puede hacerlo a expensas de  $Z$  o de  $p$ . Si se varía la altura, la compensación tiene lugar mediante un cambio de presión o de velocidad. Cada término representa un efecto de energía mecánica basado en 1 kg masa de fluido en movimiento.

## B.5.2 SIGNIFICADO FISICO DE LOS TERMINOS DE LA ECUACION DE BERNOULLI

Los términos  $gZ$  y  $v^2/2$  son la energía mecánica potencial y la energía mecánica cinética respectivamente, y  $p/\rho$  representa el trabajo mecánico realizado por fuerzas externas a la corriente sobre el fluido, al impulsarlo dentro del tubo, o el trabajo recuperado desde el fluido que sale del tubo. Por estas razones, la ec. 1.22 es una aplicación de la conservación de la energía.

La ecuación de Bernoulli tiene un intervalo de validez mayor que el que está implícito en su deducción. Por su deducción se aplica a una línea de corriente, pero como en un tubo de corriente en flujo potencial, la velocidad a través de cualquier sección transversal es constante, la ecuación puede emplearse para un tubo de corriente. El principio de conservación de la energía permite extender la ecuación al flujo potencial, que tiene lugar en tubos de corriente curvos de sección variable o bien rectos. Si el tubo está curvado, varía la dirección de la velocidad y en la ecuación de Bernoulli se utiliza la velocidad escalar, en vez de velocidad vectorial. La ecuación puede modificarse, mediante factores de corrección, para utilizarla en el flujo de capa límite, en la cual tiene lugar variaciones de velocidad

en la sección transversal. Los puntos a y b se eligen según convenga, y generalmente corresponden a localizaciones donde se dispone de la mayor información sobre presiones, velocidades y alturas.

### B.5.3 CORRECCION DEBIDA A LOS EFECTOS DE SUPERFICIES SOLIDAS

En la mayor parte de los problemas de flujo de fluidos, que se presentan en ingeniería, intervienen corrientes que están influenciadas por superficies sólidas y que por lo tanto contienen capas límite.

Para aplicar la ecuación a estos casos prácticos, es preciso introducir dos modificaciones. La primera, es una corrección del término de energía cinética debida a la variación de la velocidad local  $g$  con la posición en la capa límite, y la segunda, que es de más importancia, consiste en una corrección de la ecuación, debido a la existencia de fricción del fluido, que tiene lugar siempre que se forma una capa límite.

### B.5.4 CORRECCION DEBIDA A LA ENERGIA CINETICA DE LA CORRIENTE

Cuando la velocidad varia en la sección de la corriente, la energía cinética se halla de la forma siguiente. Consideremos un elemento de área  $dA$  en la sección transversal. La velocidad de flujo de masa a través del mismo es  $\rho v dA$ . Cada kilogramo de fluido que se mueva a través del área  $dA$  transporta una cantidad de energía cinética igual a  $v^2/2$  metro kilogramo fuerza por kilogramo masa, y la velocidad de flujo de energía a través de  $dA$  es por consiguiente:

$$d\dot{E}_k = (\rho v dA) \frac{v^2}{2} = \frac{\rho v^3 dA}{2}$$

siendo  $\dot{E}_k$  el flujo de energía cinética por unidad de tiempo. La

velocidad de flujo total de energía cinética, através de toda la sección transversal  $A$ , suponiendo la densidad constante, es la siguiente:

$$\dot{E} = \frac{\rho}{2} \int_A v^3 dA \quad (1.23)$$

y la energía cinética por kilogramo de fluido en movimiento es:

$$\frac{\dot{E}_k}{\dot{m}} = \frac{\frac{1}{2} \int_A v^3 dA}{\int_A v dA} = \frac{\frac{1}{2} \int_A v^3 dA}{\bar{V} A} \quad (1.24)$$

### FACTOR DE CORRECCION DE LA ENERGIA CINETICA

Es conveniente eliminar la Ec.(1.24), multiplicando el término  $\bar{V}^2/2$  por un factor. Este factor se denomina factor de corrección de la energía cinética, se designa por  $\alpha$  y se define por la ecuación:

$$\frac{\alpha \bar{V}^2}{2} = \frac{\dot{E}_k}{\dot{m}} = \frac{\int_A v^3 dA}{2 \bar{V} A} = \frac{\alpha \bar{V}^2}{2}$$

Donde

$$\alpha = \frac{\int_A v^3 dA}{\bar{V}^3 A} \quad (1.25)$$

Si se conoce  $\alpha$  puede emplearse la velocidad media para calcular la energía cinética, utilizando  $\alpha \bar{V}^2/2$  en lugar de  $v^2/2$ . Para la mayoría de los problemas del flujo de fluidos reales, se toma  $\alpha=1$  sin tener error apreciable.

## B.5.5 CORRECCION DEBIDA A LA FRICCION DEL FLUIDO

La fricción se manifiesta por la desaparición de energía mecánica. En el flujo con fricción, la magnitud no es constante a lo largo de una línea de corriente, sino que disminuye siempre en dirección del flujo.

La fricción de un fluido, se puede definir, como la conversión de energía mecánica en calor que tiene lugar en el flujo de una corriente.

Para fluidos no compresibles, la ecuación de Bernoulli se corrige para tener en cuenta la fricción, añadiendo un término al segundo miembro de la Ec. 1.22.

Así pues, introduciendo también los factores de corrección de la energía cinética  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$ , la Ec. 1.22 se transforma en:

$$\frac{p_a}{\rho} + gZ_a + \frac{\alpha_a \bar{V}_a^2}{2} = \frac{p_b}{\rho} + gZ_b + \frac{\alpha_b \bar{V}_b^2}{2} + h_f \quad (1.26)$$

Las unidades  $h_f$  y las de los restantes términos de la Ec. 1.26 son energía por unidad de masa. El término  $h_f$  representa toda la fricción que se produce por unidad de masa de fluido que tiene lugar en un fluido entre las posiciones a y b. Difiere de los restantes términos de la Ec. 1.26 en dos aspectos: (1) Los términos mecánicos representan las condiciones para posiciones específicas, es decir, los puntos de entrada y salida a y b, mientras que  $h_f$  representa la pérdida de energía mecánica para todos los puntos comprendidos entre las posiciones a y b. (2) La fricción no es interconvertible con las magnitudes de energía mecánica. El signo de  $h_f$ , tal como se define en la Ec. 1.26 es siempre positivo. Naturalmente, en el flujo potencial, es igual a cero.

## SIMBOLOGIA.

|       |   |
|-------|---|
| A     | Area de sección transversal, $m^2$  |
| a     | Aceleración, $m/seg^2$  |
| D     | Diámetro de conducción circular, m; $D_a$ en el punto a; $D_b$ en el punto b  |
| $E_k$ | Energía cinética del fluido, $J/Kg_m$ ; $\dot{E}_k$ , flujo de energía cinética por unidad de tiempo, $J/Kg_m\text{-seg}$ |
| g     | Aceleración de la gravedad, $m/seg^2$   |
| h     | Profundidad a partir de la superficie de referencia, m  |
| $h_f$ | Pérdidas por fricción en la conducción entre los puntos a y b, $J/Kg_m$   |
| L     | Longitud, m   |
| P     | Presión, $N/m^2$ ; $P_a$ , en el punto a; $P_b$ , en el punto b   |
| t     | Tiempo, seg   |
| V     | Velocidad de corriente por entre el tubo, $m/seg$   |
| W     | Peso del elemento, $Kg_m$   |
| x,y   | Alturas, m  |
| Z     | Altura sobre el plano de referencia, m  |

## LETRAS GRIEGAS

|          |   |
|----------|---|
| $\alpha$ | Factor de corrección de la energía cinética; $\alpha_a$ , en el punto a; $\alpha_b$ , en el punto b |
| $\rho$   | Densidad, $Kg/m^3$  |

## CAPITULO 2. CONSTRUCCION DEL EQUIPO

### 2.1 CONSTRUCCION DEL EQUIPO

Para la construcción del equipo no fué necesario realizar calculos del diseño, debido a su sencillez, además de que fue adaptado a espacio disponible para su instalación. Dicho equipo consta de :

- Tanque de alimentación de alimentación de agua, abierto a la atmósfera, con 400 lts. de capacidad.

- Tanque receptor de agua, con indicador de nivel.

- Una motobomba centrifuga de 1/2 H.P.

- Un rotámetro para la medición de gasto.

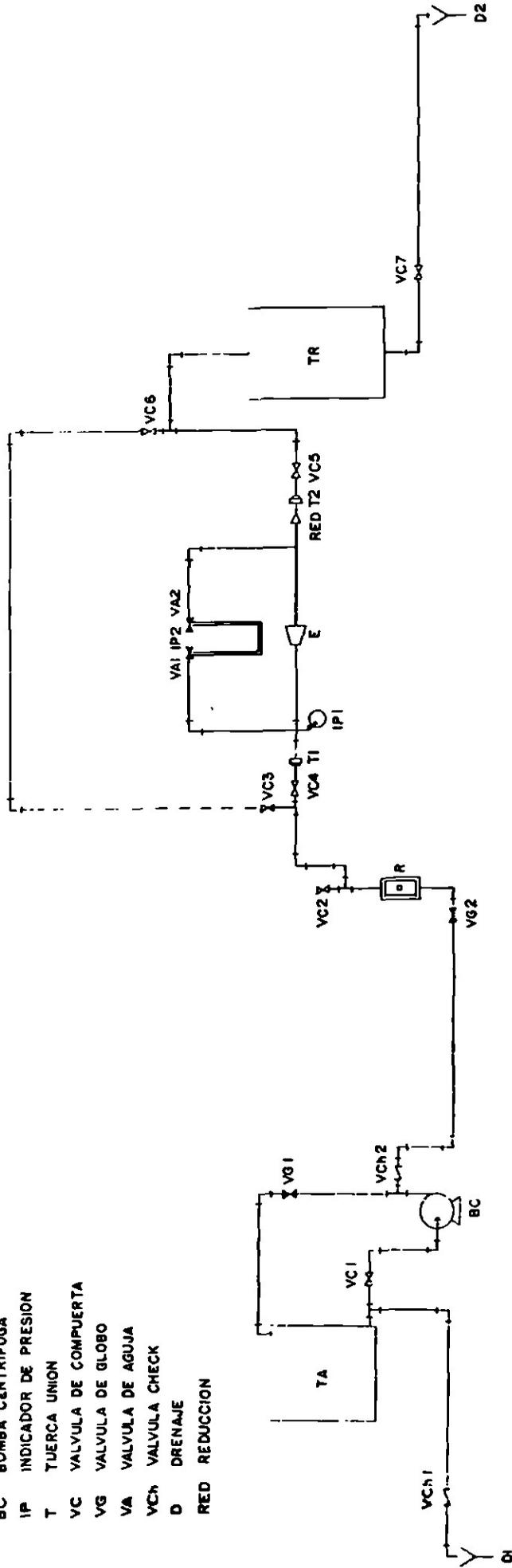
- La parte principal del equipo: dos tramos de tubería de acero galvanizado de 1/2 " y 1 1/2 " de diámetro nominal unidos por una reducción campana modificada. En ambos extremos de esta sección, hay dos tuercas unión, de modo que dicha sección pueda intercambiarse de posición horizontal a vertical, y viceversa.

- Dos manómetros, uno de Bourdón y el segundo de tubo en "U", instalados en los extremos de la sección de medición correspondiente, en el tramo de tubería de diferente diámetro.

- Tuberías, válvulas y accesorios.

# DIAGRAMA DE FLUJO

- TA TANQUE DE ALIMENTACION
- TR TANQUE RECEPTOR
- R ROTAMETRO
- E EXPANSION
- BC BOMBA CENTRIFUGA
- IP INDICADOR DE PRESION
- T TUERCA UNION
- VC VALVULA DE COMPUERTA
- VG VALVULA DE GLOBO
- VA VALVULA DE AGUJA
- VCh VALVULA CHECK
- D DRENAJE
- RED REDUCCION



# PRACTICA No. 1

## BALANCE DE ENERGIA MECANICA

### ECUACION DE BERNOULLI

#### I. OBJETIVO.

- a. Demostrar la aplicación práctica de la ecuación de balance de energía mecánica, conocida como Ecuación de Bernoulli.
- b. Determinar experimentalmente las pérdidas por fricción que experimenta un fluido al pasar a través de una tubería.
- c. Comparar los resultados teóricos y experimentales.

#### II. CONSIDERACIONES TEORICAS.

Una partícula en el seno de un líquido tiene energía mecánica de tres tipos: cinética, potencial y de presión. La suma de estas tres energías, divididas por la masa de la partícula es constante cuando no se suma ni se resta trabajo mecánico a la misma. Esto sirve como base para el teorema que dice que la suma de los tres tipos de energía debe ser constante y que es demostrado por el principio de conservación de la energía, suponiendo que el flujo es potencial, estacionario, isotérmico e incompresible.

Sumando los tres tipos de energía mecánica:

$$\frac{P}{\rho} + gz + \frac{1}{2} v^2 = \text{cte} \quad (1-1)$$

en donde:

P Presión del fluido, Kgr / m<sup>2</sup>

v Velocidad del fluido, m / seg

- $\rho$  Densidad del fluido,  $\text{Kg} / \text{m}^3$
- $z$  Altura,  $\text{m}$
- $g$  Aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m} / \text{seg}^2$

Cada término representa un efecto de energía mecánica basado en un kilogramo masa de fluido en movimiento. Los términos  $gz$  y  $v^2/2$  son la energía mecánica potencial y cinética respectivamente y  $P/\rho$  representa el trabajo mecánico realizado por las fuerzas externas a la corriente sobre el fluido.

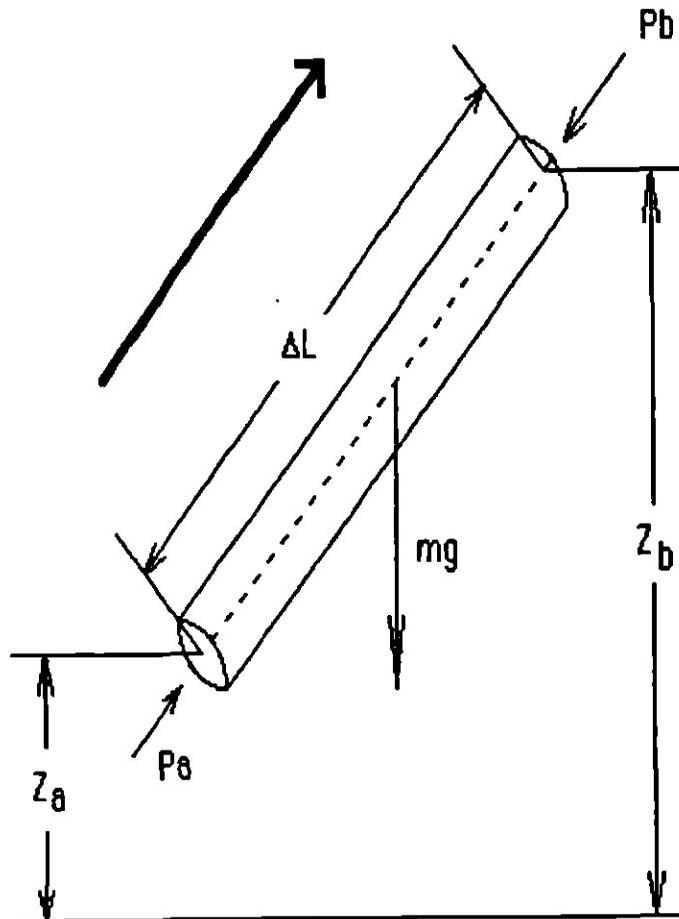


FIG. 1.1 ELEMENTO DE VOLUMEN DE UNA CORRIENTE EN UN TUBO Y FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE EL MISMO.

Considerando un elemento de volumen de fluido que circula a lo largo de un tubo de corriente de sección constante, con flujo potencial estacionario, como se representa en la figura 1-1 y mediante un análisis de fuerzas:

$$\frac{P_a}{\rho} + g Z_a + \frac{v_a^2}{2} = \frac{P_b}{\rho} + g Z_b + \frac{v_b^2}{2} \quad (1-2)$$

Esta ecuación es una forma del principio de conservación de la energía y se le conoce como la ecuación de Bernoulli sin fricción.

a. CORRECCION DEBIDA A LA ENERGIA CINETICA.

El término  $v^2/2$  de la ecuación (1-2) es la energía cinética por Kilogramo del fluido, cuando todo él se mueve a la misma velocidad  $V$ . Cuando la velocidad varía en la sección de la corriente, es necesario introducir un factor  $\alpha$  para poder emplear la velocidad media  $\bar{v}$ ; este factor se define de la siguiente forma:

$$\frac{E_k}{m} = \frac{\alpha \bar{v}^2}{2} \quad (1-3)$$

en donde:

$E_k$  Energía cinética,  $\text{Kg-m}^2 / \text{seg}^2$

$m$  Masa del fluido,  $\text{Kg}$

Para la mayoría de los problemas del flujo de fluidos reales, se toma  $\alpha=1$  sin tener error apreciable.

b. CORRECCION DEBIDA A LA EXISTENCIA DE FRICCION EN EL FLUIDO.

La fricción se manifiesta por la desaparición de energía mecánica. La ecuación de Bernoulli se corrige para tener en cuenta

la fricción, añadiendo el término  $h_f$  al segundo miembro de la ecuación (1-2). Así pues, introduciendo también los factores de corrección de la energía cinética  $a$  y  $b$ , la ecuación (1-2) se transforma en:

$$\frac{p_a}{\rho} + g Z_a + \frac{\alpha_a v_a^2}{2} = \frac{p_b}{\rho} + g Z_b + \frac{\alpha_b v_b^2}{2} + h_f \quad (1-4)$$

## MECANISMOS PARA MEDIR PRESION

Un manómetro es un aparato importante para medir diferencias de presión.

### Manómetro de Tubo en "U"

Este indicador es el más antiguo y uno de los más exactos. Se usa como patrón para establecer la precisión de todos los demás instrumentos que miden presión.

Consiste de un tubo de vidrio (o plástico transparente) doblado en forma de "U" (fig. 1-2) y lleno hasta la marca de la escala (cero normalmente) de agua, mercurio, aceite o cualquier otro líquido de densidad conocida; la presión se aplica en una de las tomas y el nivel del líquido se desbalancea, aumentando en la toma contraria (abierto a la atmósfera) y disminuyendo en el otro. La presión se calcula de acuerdo a la diferencia de niveles.

Con los tubos en "U" se mide presión o vacío en función de la presión de la presión atmosférica, están limitados por el material del tubo y la altura del líquido disponible. Su exactitud es de décimas de centímetro. Se puede utilizar para medir presiones absolutas con solo cerrar uno de los extremos (Fig. 1-2 B). Se pueden medir presiones diferenciales, introduciendo presión en ambos extremos del tubo; la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2 viene dada por la expresión:

$$\Delta P = \Delta Z (\rho_m - \rho_p) g \quad (1-5)$$

- $\Delta P$  Caída de presión en los puntos 1 y 2,  $\text{Kg/m}^2$   
 $\Delta Z$  Diferencia de alturas entre las dos ramas del manómetro, m  
 $\rho_m$  Densidad del líquido manométrico,  $\text{Kg/m}^3$   
 $\rho_p$  Densidad del fluido de proceso,  $\text{Kg/m}^3$

El uso de estos manómetros no es recomendable debido a problemas en la lectura, sin embargo se utilizan en la industria, en los laboratorios y talleres de instrumentos, como patrones para la calibración de otros manómetros.

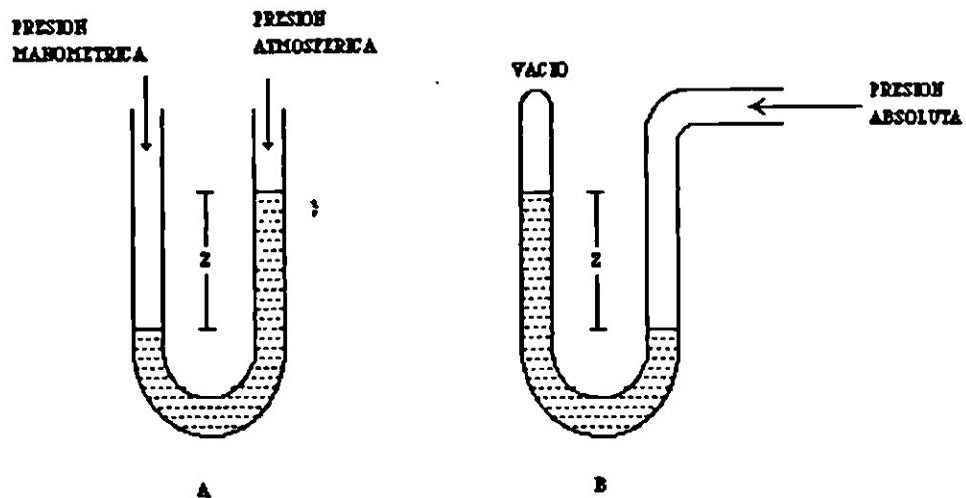


FIG. 1-2. MANOMETRO DE TUBO EN "U"

#### Manómetro de Tubo Inclinado.

El tubo inclinado (Fig. 1-3) es similar al tubo en U, con la diferencia de que uno de los ramales está inclinado y tiene el extremo de gran diámetro y en forma de pozo, el cual aumenta la exactitud de la lectura.

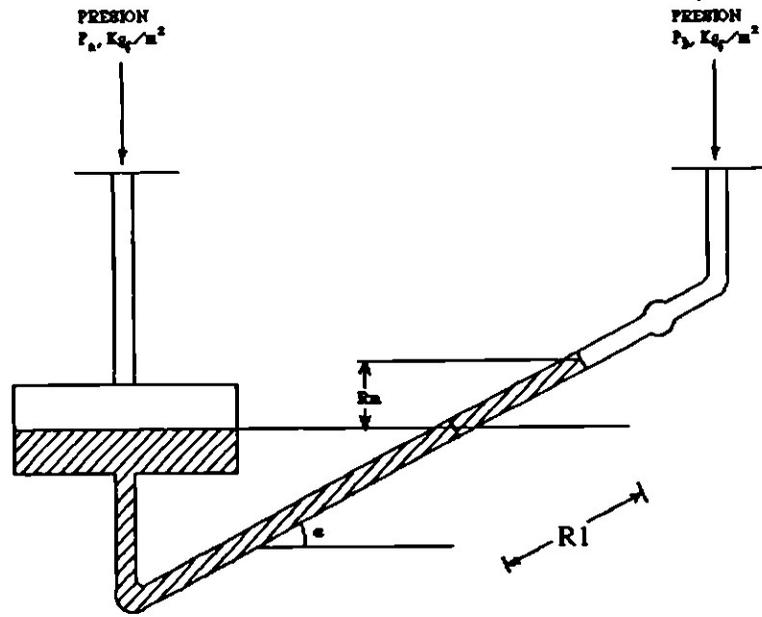


FIG. 1-3. MANOMETRO INCLINADO.

Este tipo de indicador es para presiones muy bajas o caídas de presión también muy pequeñas. En este último caso, la diferencia de presiones viene dada por la expresión:

$$P = R_l (\rho_m - \rho_p) (\text{sen } \alpha) g \quad (1-6)$$

#### Manómetro de tubo bourdón.

El tubo bourdón es un tubo de sección transversal aplanada, moldeado para formar un círculo incompleto (o una espiral o una hélice) el cual tiende a enderezarse cuando aumenta la presión. El movimiento transmitido al medidor se multiplica por medio de levas y engranes.

Los materiales con que se fabrican los tubos bourdón son muy variados y dependen de la presión y fluido a medir, pueden hacerse de

bronce, acero al carbón, acero inoxidable, etc.; y se fabrican para medir rangos de presión de 0 a 2, 4, 10, 20, 100, 1000. Kg/cm<sup>2</sup> y como es natural, dependiendo de como aumenta el rango de presión el bourdón es de mayor resistencia al esfuerzo.

El movimiento del extremo libre de un tubo bourdón de diseño y forma apropiada, está definido para cada incremento de presión, por lo tanto la posición del puntero indicará sobre la carátula la presión que existe dentro del tubo bourdón.

Los principios mecánicos y matemáticos que rigen el diseño de un bourdón son bastante complejos y es necesario un conocimiento completo al respecto para diseñar un tubo apropiado y asegurar su gama de trabajo sin riesgos. Es necesario tener en cuenta en su fabricación, el material, el estirado, el doblado y el tratamiento térmico.

El tubo bourdón debe ser protegido contra presiones, temperaturas y vibraciones excesivas, así como contra la corrosión.

### III. EQUIPO UTILIZADO.

El equipo utilizado consta de:

- a. Un tanque de alimentación de agua, abierto a la atmósfera con capacidad de 400 litros.
- b. Un tanque receptor de agua, con indicador de nivel.
- c. Una motobomba centrífuga de 1/2 H.P.
- d. Un rotámetro para medir el gasto.
- e. La parte principal del equipo, la forman dos tramos de tubería de tubería de acero galvanizado de 1/2" y 1 1/2" de diámetro nominal unidos por una reducción campana. En los extremos de esta sección hay dos tuercas unión, de modo que ésta pueda intercambiarse de posición horizontal a posición vertical.

- f. Dos manómetros, uno de bourdon y el segundo de tubo en "U", instalados en los extremos de la sección de medición correspondiente.
- g. Tuberías, válvulas y accesorios.

#### IV. DATOS NECESARIOS.

- a. Datos conocidos:
  - Material de construcción de las tuberías: acero galvanizado cédula 40.
  - Diámetro nominal de los tramos de medición: 1/2 " y 1 1/2" respectivamente.
  - Constante del rotámetro: 72 lt/min.
- b. Datos que se deberán tomar:
  - Temperatura de operación.
  - Gasto volumétrico (en % de rotámetro).
  - Presión en cada uno de los manómetros.
  - Densidad del agua a la temperatura de operación.
  - Altura (sobre el nivel del piso) a la que se encuentran los manómetros en las diferentes posiciones.

#### V. PROCEDIMIENTO.

- a. Verificar que todas las válvulas estén cerradas.
- b. Abrir la válvula de alimentación de agua y llenar el tanque alimentador.
- c. Instalar el tramo de medición en la posición horizontal.
- d. Medir la altura a la que se encuentran los manómetros.
- e. Alinear válvulas.
- f. Conectar la bomba.
- g. Fijar el gasto dado por el instructor (con el rotámetro).

- h. Medir la presión en los puntos 1 y 2.
- i. Repetir los puntos g y h hasta completar la tabla de gastos dada por el instructor.
- j. Desconectar la bomba.
- k. Aflojar las tuercas unión para desmontar el tramo de medición.
- l. Instalar el tramo de medición en la posición vertical.
- m. Repetir los puntos d a k.
- n. Cerrar todas las válvulas.

## VI. CALCULOS.

### PARA LA POSICION HORIZONTAL

- a. Cálculo del gasto volumétrico.
- b. Cálculo de la velocidad media en los puntos 1 y 2.
- c. Cálculo de la energía cinética en los puntos 1 y 2
- d. Cálculo de la energía potencial en los puntos a y b
- e. Cálculo de la presión teórica en el punto b, tomando como dato conocido la presión en el punto a (aplicando la ecuación de Bernoulli sin fricción).
- f. Cálculo de caída de presión experimental.
- g. Cálculo de la presión en el punto b, experimental.
- h. Cálculo de las pérdidas por fricción experimentales.

### PARA LA POSICION VERTICAL

- i. Cálculo de la energía potencial en los puntos a y b
- j. Cálculo de la presión en el punto b teórica, empleando la ecuación Bernoulli SIN considerar  $h_f$ .
- k. Cálculo de la presión en el punto b teórica, empleando la ecuación de Bernoulli considerando  $h_f$  calculado en inciso h.
- l. Cálculo de la caída de presión experimental (haciendo las correcciones debidas a la diferencia de alturas de las tomas de presión a y b.

- m. Cálculo de la presión experimental en el punto b.
- n. Cálculo de porcentaje de error.
- o. Gráficas de pérdidas de fricción contra gasto y la presión en el punto b contra gasto ( realizando comparación de cada presión calculada) correspondiente para la posición horizontal y posición posición vertical.

## VII. PRESENTACION DE RESULTADOS.

La presentación de resultados se har de la siguiente manera:

- a. Tabla de datos necesarios: conocidos y determinados experimentalmente.
- b. Tabla de resultados.
- c. Conclusiones.

## VIII. NOMENCLATURA.

- $E_k$  Energía cinética,  $kg\cdot m^2 / seg^2$
- $g$  Aceleración de la gravedad,  $9.8 m / seg^2$
- $g_c$  Factor de conversión de la ley de Newton,  $kg\cdot m / kg_f\cdot seg^2$
- $h_f$  Pérdidas por fricción,  $m\cdot kg_f / kg$
- $m$  Masa del fluido,  $kg$
- $P$  Presión,  $kg_f / m^2$ ;  $P_a$ ,  $P_b$ , de los puntos a y b respectivamente
- $v$  Velocidad,  $m/seg$ ;  $v$ , velocidad media;  $v_a$  y  $v_b$ , en los puntos a y b
- $Z$  Altura,  $m$ ;  $Z_a$ ,  $Z_b$ , de los puntos a y b.
- $\alpha$  Factor de corrección de la energía cinética, adimensional;  $a$ ,  $b$ ,  $b$ , en los puntos a y b.
- $\rho$  Densidad del fluido,  $kg / m^3$

IX. BIBLIOGRAFIA.

- a. MC. CABE W.L. Y SMITH J.C.  
OPERACIONES BASICAS DE INGENIERIA QUIMICA  
EDITORIAL REVERTE
  
- b. PERRY J.H.  
MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO  
5a. EDICION  
EDITORIAL MC. GRAW HILL

### CAPITULO 3. CALCULOS

A. DATOS.

|                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Temperatura de Trabajo              | 15° C                        |
| Densidad del Agua                   | 999.1176 kg/m <sup>3</sup>   |
| Densidad del Mercurio               | 13557.9254 kg/m <sup>3</sup> |
| Constante de Rotámetro              | 72 lt/min                    |
| Tubería 1/2" DN Diámetro interior   | 0.01580 m                    |
| Tubería 1 1/2" DN Diámetro interior | 0.04089 m                    |

|             |             | POSICION HORIZONTAL                          |          | POSICION VERTICAL                            |          |
|-------------|-------------|--|----------|--|----------|
| No. corrida | % Rotámetro | Presión <sub>2</sub> A<br>kg/cm <sup>2</sup> | ΔZ<br>cm | Presión <sub>2</sub> A<br>kg/cm <sup>2</sup> | ΔZ<br>cm |
| 1           | 20          | 0.150  | 0.4      | 0.200  | 0.5      |
| 2           | 25          | 0.200  | 1.0      | 0.250  | 0.7      |
| 3           | 30          | 0.290  | 1.8      | 0.350  | 1.2      |
| 4           | 35          | 0.350  | 2.3      | 0.400  | 1.8      |
| 5           | 40          | 0.400  | 3.0      | 0.500  | 2.4      |
| 6           | 45          | 0.575  | 4.8      | 0.600  | 3.3      |
| 7           | 50          | 0.650  | 5.5      | 0.750  | 4.2      |
| 8           | 55          | 0.825  | 7.1      | 0.850  | 5.5      |
| 9           | 60          | 0.950  | 8.3      | 1.050  | 6.5      |
| 10          | 65          | 1.050  | 9.5      | 1.200  | 7.6      |
| 11          | 70          | 1.200  | 11.3     | 1.375  | 9.1      |
| 12          | 75          | 1.400  | 13.2     | 1.550  | 10.2     |
| 13          | 80          | 1.625  | 14.8     |  |          |

B. Cálculo del Gasto Volumétrico.

$$q = \frac{(\% \text{ Rotámetro})(72 \text{ lt/min})}{100 \%} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ lt}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}$$

$$1. \quad q = \frac{(20\%)(72 \text{ lt/min})}{100 \%} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ lt}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 0.00024 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$2. \quad q = 0.00030 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$3. \quad q = 0.00036 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$4. \quad q = 0.00042 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$5. \quad q = 0.00048 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$6. \quad q = 0.00054 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$7. \quad q = 0.00060 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$8. \quad q = 0.00066 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$9. \quad q = 0.00072 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$10. \quad q = 0.00078 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$11. \quad q = 0.00084 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$12. \quad q = 0.00090 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$13. \quad q = 0.00096 \text{ m}^3/\text{seg}$$

POSICION HORIZONTAL

C. Cálculo de la velocidad media en los puntos a y b.

$$\bar{v} = \frac{4 q}{\pi D^2}$$

$$1. \quad v_a = \frac{4(0.00024 \text{ m}^3/\text{seg})}{\pi (0.0158 \text{ m})^2} = 1.2241 \text{ m/seg}$$

$$v_b = \frac{4(0.00024 \text{ m}^3/\text{seg})}{\pi (0.04089 \text{ m})^2} = 0.1827 \text{ m/seg}$$

$$2. \quad v_a = 1.5300 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.2284 \text{ m/seg}$$

$$3. \quad v_a = 1.8362 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.2741 \text{ m/seg}$$

$$4. \quad v_a = 2.1421 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.3198 \text{ m/seg}$$

$$5. \quad v_a = 2.4481 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.3655 \text{ m/seg}$$

$$6. \quad v_a = 2.7541 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.4112 \text{ m/seg}$$

$$7. \quad v_a = 3.0600 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.4569 \text{ m/seg}$$

$$8. \quad v_a = 3.3662 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.5025 \text{ m/seg}$$

$$9. \quad v_a = 3.6722 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.5483 \text{ m/seg}$$

$$10. \quad v_a = 3.9782 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.5939 \text{ m/seg}$$

$$11. \quad v_a = 4.2842 \text{ m/seg}$$

$$v_b = 0.6396 \text{ m/seg}$$

12.  $V_a = 4.5903 \text{ m/seg}$   
 $V_b = 0.6853 \text{ m/seg}$

13.  $V_a = 4.8963 \text{ m/seg}$   
 $V_b = 0.7310 \text{ m/seg}$

D. Cálculo de la energía cinética en los puntos 1 y 2

$$E_k = \frac{\bar{V}^2}{2}$$

1.  $E_{Ka} = \frac{(1.2241 \text{ m/seg})^2}{2} = 0.7492 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = \frac{(0.1827 \text{ m/seg})^2}{2} = 0.0167 \text{ J/ kg}_m$

2.  $E_{Ka} = 1.1706 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.0261 \text{ J/ kg}_m$

3.  $E_{Ka} = 1.6856 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.0376 \text{ J/ kg}_m$

4.  $E_{Ka} = 2.2943 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.0511 \text{ J/ kg}_m$

5.  $E_{Ka} = 2.9967 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.0668 \text{ J/ kg}_m$

6.  $E_{Ka} = 3.7927 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.0845 \text{ J/ kg}_m$

7.  $E_{Ka} = 4.6823 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.1043 \text{ J/ kg}_m$

8.  $E_{Ka} = 5.6656 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.1263 \text{ J/ kg}_m$

9.  $E_{Ka} = 6.7426 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.1503 \text{ J/ kg}_m$

10.  $E_{Ka} = 7.9132 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.1764 \text{ J/ kg}_m$

11.  $E_{Ka} = 9.1774 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.2046 \text{ J/ kg}_m$

12.  $E_{Ka} = 10.5353 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.2349 \text{ J/ kg}_m$

13.  $E_{Ka} = 11.9868 \text{ J/ kg}_m$

$E_{Kb} = 0.2672 \text{ J/ kg}_m$

E. Cálculo de energía potencial en los puntos 1 y 2 para la posición horizontal.

$$E_{Pa} = Zg$$

$$E_{Pa} = (0.82 \text{ m})(9.8 \text{ m/seg}^2) = 8.036 \text{ J/ kg}_m$$

$$E_{Pb} = (0.82 \text{ m})(9.8 \text{ m/seg}^2) = 8.036 \text{ J/ kg}_m$$

Por lo que para cualquier gasto volumetrico la Energía potencial tiene el mismo valor.

F. Cálculo de la presión teórica en el punto Z, tomando como dato conocido la presión en el punto 1 (aplicando la ecuación de bernoulli).

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_b + \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c}$$

$$\frac{g}{g_c} Z_a = \frac{g}{g_c} Z_b = \text{constante}$$

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c}$$

$$P_b = \left[ \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} + \frac{P_a}{\rho} + \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c} \right] \rho = \left[ \frac{P_a}{\rho} + E_{Ka} - E_{Kb} \right] \rho$$

$$1. P_b = \left[ \frac{0.15 \text{ kg/cm}^2 \times 98064.37}{999.1176 \text{ kg/m}^3} + 0.7492 \text{ J/ kg}_m - 0.0167 \text{ J/kg}_m \right] \rho$$

$$\rho = 999.1176 \text{ kg/m}^3$$

$$P_b = 15441.49 \text{ N/m}^2$$

$$2. P_b = 20756.36 \text{ N/m}^2$$

$$8. P_b = 86437.56 \text{ N/m}^2$$

$$3. P_b = 30085.28 \text{ N/m}^2$$

$$9. P_b = 99747.62 \text{ N/m}^2$$

$$4. P_b = 36563.76 \text{ N/m}^2$$

$$10. P_b = 110697.5 \text{ N/m}^2$$

$$5. P_b = 42153.07 \text{ N/m}^2$$

$$11. P_b = 126694.2 \text{ N/m}^2$$

$$6. P_b = 60091.90 \text{ N/m}^2$$

$$12. P_b = 147581.5 \text{ N/m}^2$$

$$7. P_b = 68315.77 \text{ N/m}^2$$

$$13. P_b = 171063.9 \text{ N/m}^2$$

G. Cálculo de  $\Delta P$  experimental.

$$\Delta P_{\text{exp}} = \Delta Z(\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{H}_2\text{O}}) g$$

$$1. \Delta P_{\text{exp}} = 0.004 \text{ m} (13557.9254 \text{ kg/m}^3 - 999.1176 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$\Delta P_{\text{exp}} = 492.3128 \text{ N/m}^2$$

$$2. \Delta P_{\text{exp}} = 1230.782 \text{ N/m}^2$$

$$8. \Delta P_{\text{exp}} = 8738.552 \text{ N/m}^2$$

$$3. \Delta P_{\text{exp}} = 2215.407 \text{ N/m}^2$$

$$9. \Delta P_{\text{exp}} = 10215.49 \text{ N/m}^2$$

$$4. \Delta P_{\text{exp}} = 2830.798 \text{ N/m}^2$$

$$10. \Delta P_{\text{exp}} = 11692.43 \text{ N/m}^2$$

$$5. \Delta P_{\text{exp}} = 3692.346 \text{ N/m}^2$$

$$11. \Delta P_{\text{exp}} = 13902.84 \text{ N/m}^2$$

$$6. \Delta P_{\text{exp}} = 5907.754 \text{ N/m}^2$$

$$12. \Delta P_{\text{exp}} = 16246.32 \text{ N/m}^2$$

$$7. \Delta P_{\text{exp}} = 6769.301 \text{ N/m}^2$$

$$13. \Delta P_{\text{exp}} = 18215.57 \text{ N/m}^2$$

H. Cálculo de la presión en el punto b (experimental).

$$P_{b \text{ exp}} = P_a - \Delta P_{\text{exp}}$$

$$1. P_{b \text{ exp}} = 14709.6561 \text{ N/m} - 492.3128 \text{ N/m} = 14217.34 \text{ N/m}$$

$$2. P_{b \text{ exp}} = 18382.09 \text{ N/m}^2$$

$$3. P_{b \text{ exp}} = 26223.26 \text{ N/m}^2$$

4.  $P_{b \text{ exp}} = 31491.73 \text{ N/m}^2$
5.  $P_{b \text{ exp}} = 35533.41 \text{ N/m}^2$
6.  $P_{b \text{ exp}} = 50479.26 \text{ N/m}^2$
7.  $P_{b \text{ exp}} = 56972.54 \text{ N/m}^2$
8.  $P_{b \text{ exp}} = 72164.56 \text{ N/m}^2$

9.  $P_{b \text{ exp}} = 82945.66 \text{ N/m}^2$
10.  $P_{b \text{ exp}} = 91275.16 \text{ N/m}^2$
11.  $P_{b \text{ exp}} = 103769.4 \text{ N/m}^2$
12.  $P_{b \text{ exp}} = 121043.8 \text{ N/m}^2$
13.  $P_{b \text{ exp}} = 141139.0 \text{ N/m}^2$

I. Cálculo de pérdidas por fricción experimentales.

$$h_f = \frac{P_{b(\text{teo})} - P_{b(\text{exp})}}{\rho_{H_2O}}$$

$$1. h_f = \frac{15441.49 \text{ N/m}^2 - 14217.34 \text{ N/m}^2}{997.1176 \text{ kg/m}^3} = 1.2252 \text{ J/ kg}_m$$

$$2. h_f = 2.3763 \text{ J/ kg}_m$$

$$3. h_f = 3.8654 \text{ J/ kg}_m$$

$$4. h_f = 5.0765 \text{ J/ kg}_m$$

$$5. h_f = 6.6255 \text{ J/ kg}_m$$

$$6. h_f = 9.6211 \text{ J/ kg}_m$$

$$7. h_f = 11.3535 \text{ J/ kg}_m$$

$$8. h_f = 14.2856 \text{ J/ kg}_m$$

$$9. h_f = 16.8168 \text{ J/ kg}_m$$

$$10. h_f = 19.4395 \text{ J/ kg}_m$$

$$11. h_f = 22.8929 \text{ J/ kg}_m$$

$$12. h_f = 26.5611 \text{ J/ kg}_m$$

$$13. h_f = 29.9513 \text{ J/ kg}_m$$

## POSICION VERTICAL. CALCULOS

J. Cálculo de la energía potencial en los puntos 1 y 2 para la posición vertical.

$$E_p = Zg$$

1.  $E_p = 1.12 \text{ m} (9.8 \text{ m/s}^2) = 10.976 \text{ J/ kg}_m$   
 $E_p = 2.44 \text{ m} (9.8 \text{ m/s}^2) = 23.912 \text{ J/ kg}_m$

Para cualquier gasto volumétrico la Energía Potencial tiene el mismo valor correspondiente a cada punto.

H. Cálculo de la presión teórica en el punto b para la posición vertical, con la ecuación de Bernoulli.

- Sin considerar  $h_f$  calculado en el punto b

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_b + \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c}$$

$$P_b = \left[ \frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} - \frac{g}{g_c} Z_b - \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c} \right] \rho = \left[ \frac{P_a}{\rho} + E_{Pa} + E_{Ka} - E_{Pb} - E_{Kb} \right] \rho$$

1.  $P_b = \left[ \frac{0.2 \text{ kg/cm}^2 \times 98064.3739}{999.1176} + 10.976 \text{ J/ kg}_m + 0.7492 \text{ J/ kg}_m - \right.$   
 $\left. 23.912 \text{ J/ kg}_m - 0.0167 \text{ J/ kg}_m \right] (999.1176 \text{ kg/m}^3) = 7420.12 \text{ N/m}^2$

2.  $P_b = 12734.99 \text{ N/m}^2$

6.  $P_b = 49618.93 \text{ N/m}^2$

3.  $P_b = 23044.56 \text{ N/m}^2$

7.  $P_b = 64197.63 \text{ N/m}^2$

4.  $P_b = 28542.39 \text{ N/m}^2$

8.  $P_b = 75964.59 \text{ N/m}^2$

5.  $P_b = 39034.92 \text{ N/m}^2$

9.  $P_b = 96629.41 \text{ N/m}^2$

$$10. P_b = 112482.6 \text{ N/m}^2$$

$$12. P_b = 149366.6 \text{ N/m}^2$$

$$11. P_b = 130878.8 \text{ N/m}^2$$

L. Cálculo de la presión en el punto b considerando  $h_f$ .

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_b + \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c} + h_f$$

$$P_b = \left[ \frac{P_a}{\rho} + \frac{g}{g_c} Z_a + \frac{\bar{V}_a^2}{2 g_c} - \frac{g}{g_c} Z_b - \frac{\bar{V}_b^2}{2 g_c} \right] \rho = \left[ \frac{P_a}{\rho} + E_{Pa} - E_{Ka} - E_{Pb} - E_{Kb} - h_f \right] \rho$$

$$1. P_b = \left[ \frac{19612.87 \text{ N/m}^2}{999.1176 \text{ kg/m}^3} + 10.976 \text{ J/kg}_m + 0.7492 \text{ J/kg}_m - 23.912 \text{ J/kg}_m - 0.0167 \text{ J/kg}_m \right] (999.1176) = 6195.979 \text{ N/m}^2$$

$$2. P_b = 10360.72 \text{ N/m}^2$$

$$8. P_b = 61691.58 \text{ N/m}^2$$

$$3. P_b = 19182.54 \text{ N/m}^2$$

$$9. P_b = 79827.50 \text{ N/m}^2$$

$$4. P_b = 23470.36 \text{ N/m}^2$$

$$10. P_b = 93060.24 \text{ N/m}^2$$

$$5. P_b = 32415.26 \text{ N/m}^2$$

$$11. P_b = 108006.1 \text{ N/m}^2$$

$$6. P_b = 40006.29 \text{ N/m}^2$$

$$12. P_b = 122828.9 \text{ N/m}^2$$

$$7. P_b = 53854.40 \text{ N/m}^2$$

M. Cálculo de  $\Delta P$  experimental.

$$\Delta P_{\text{exp}} = \frac{g}{g_c} (Z_2 + Z_1) \rho_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{g}{g_c} \Delta Z \rho_{\text{Hg}} = \frac{g}{g_c} (Z_b - Z_a - \Delta Z) \rho_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{g}{g_c} \Delta Z \rho_{\text{Hg}}$$

$$1. \Delta P_{\text{exp}} = (9.8 \text{ m/s}^2)(2.44\text{m} - 1.12\text{m} - 0.005\text{m})(999.1176\text{kg/m}^3) + (9.8\text{m/s}^2)(0.005\text{m})(13557.9254)$$

$$\Delta P_{\text{exp}} = 13539.98 \text{ N/m}^2$$

- |  |   |
|--|---|
| 2. $\Delta P_{exp} = 13786.13 \text{ N/m}^2$ | 8. $\Delta P_{exp} = 19693.89 \text{ N/m}^2$  |
| 3. $\Delta P_{exp} = 14401.53 \text{ N/m}^2$ | 9. $\Delta P_{exp} = 20924.67 \text{ N/m}^2$  |
| 4. $\Delta P_{exp} = 15139.99 \text{ N/m}^2$ | 10. $\Delta P_{exp} = 22278.53 \text{ N/m}^2$ |
| 5. $\Delta P_{exp} = 15878.46 \text{ N/m}^2$ | 11. $\Delta P_{exp} = 24124.70 \text{ N/m}^2$ |
| 6. $\Delta P_{exp} = 16986.17 \text{ N/m}^2$ | 12. $\Delta P_{exp} = 25478.56 \text{ N/m}^2$ |
| 7. $\Delta P_{exp} = 18093.87 \text{ N/m}^2$ |   |

N. Cálculo de la presión experimental en el punto b.

$$P_{b \text{ exp}} = P_a - \Delta P_{exp}$$

- |   |  |
|---|--|
| 1. $P_{b \text{ exp}} = 19612.8748 \text{ N/m}^2 - 13539.98 \text{ N/m}^2 = 6072.894 \text{ N/m}^2$ |  |
| 2. $P_{b \text{ exp}} = 10729.96 \text{ N/m}^2$   | 8. $P_{b \text{ exp}} = 63660.83 \text{ N/m}^2$  |
| 3. $P_{b \text{ exp}} = 19921.01 \text{ N/m}^2$   | 9. $P_{b \text{ exp}} = 82042.93 \text{ N/m}^2$  |
| 4. $P_{b \text{ exp}} = 24085.76 \text{ N/m}^2$   | 10. $P_{b \text{ exp}} = 95398.72 \text{ N/m}^2$ |
| 5. $P_{b \text{ exp}} = 33153.53 \text{ N/m}^2$   | 11. $P_{b \text{ exp}} = 110713.8 \text{ N/m}^2$ |
| 6. $P_{b \text{ exp}} = 41852.46 \text{ N/m}^2$   | 12. $P_{b \text{ exp}} = 126521.2 \text{ N/m}^2$ |
| 7. $P_{b \text{ exp}} = 55454.42 \text{ N/m}^2$   |  |

O. Cálculo de % Error

$$\% \text{ Error} = \frac{P_{teo} - P_{exp}}{P_{teo}} \times 100$$

$$1. \% E = \frac{6195.979 \text{ N/m}^2 - 6072.894 \text{ N/m}^2}{6195.979 \text{ N/m}^2} \times 100 = 1.98$$

$$2. \% E = 3.56 \%$$

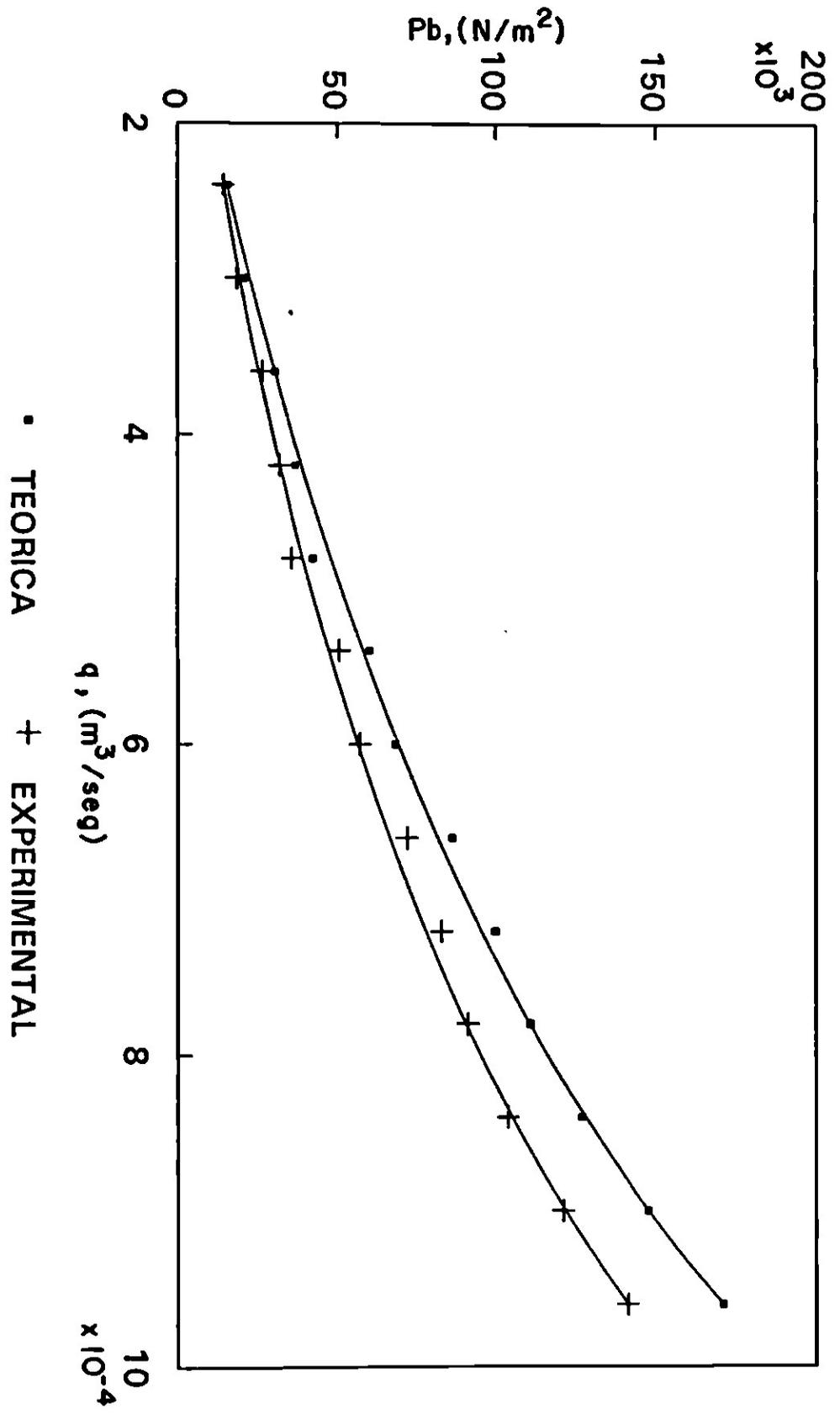
$$3. \% E = 3.84 \%$$

- 4. % E = 2.62 %
- 5. % E = 2.28 %
- 6. % E = 4.61 %
- 7. % E = 2.97 %
- 8. % E = 3.19 %

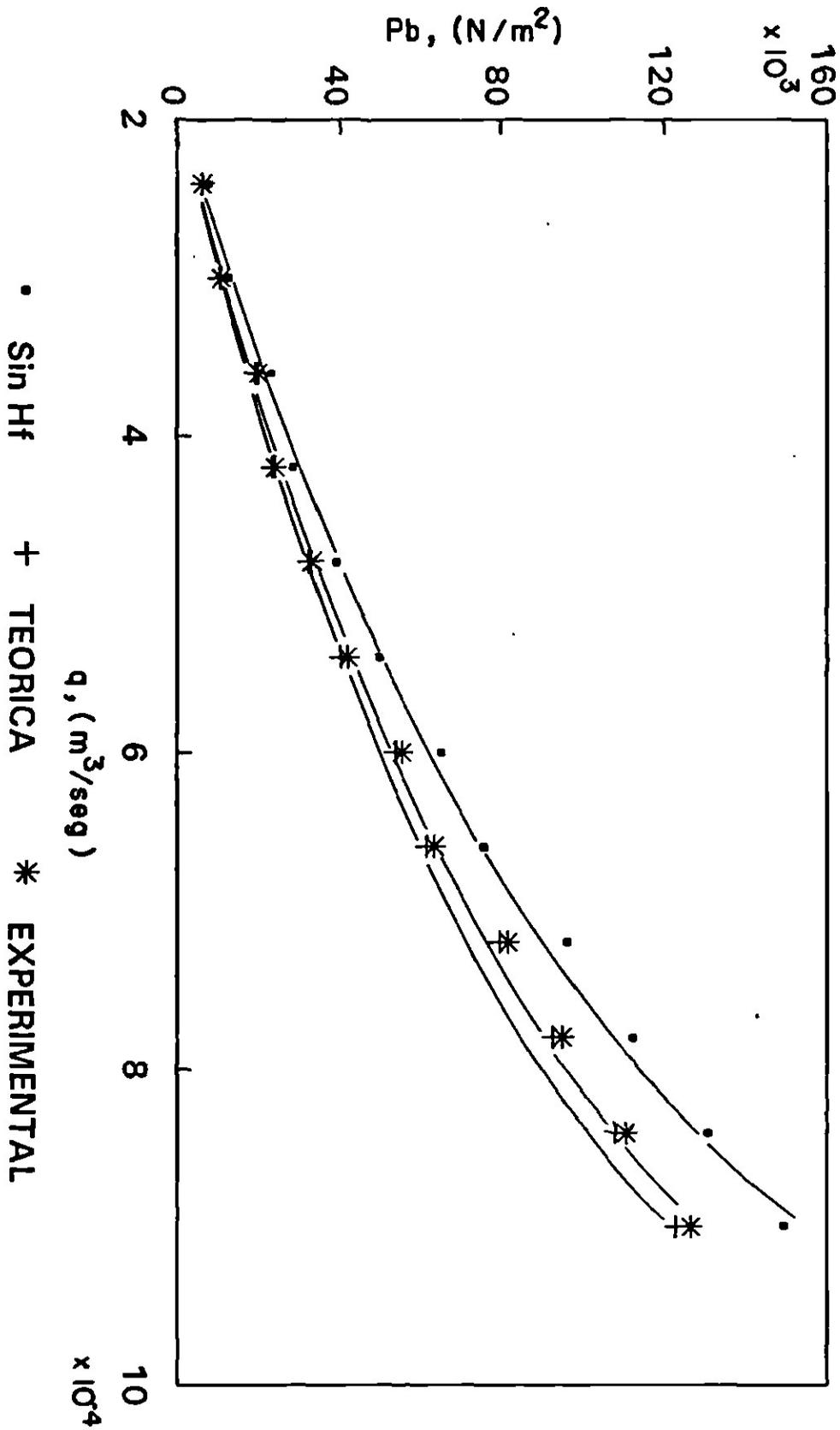
- 9. % E = 2.77 %
- 10. % E = 2.51 %
- 11. % E = 2.50 %
- 12. % E = 3.00 %



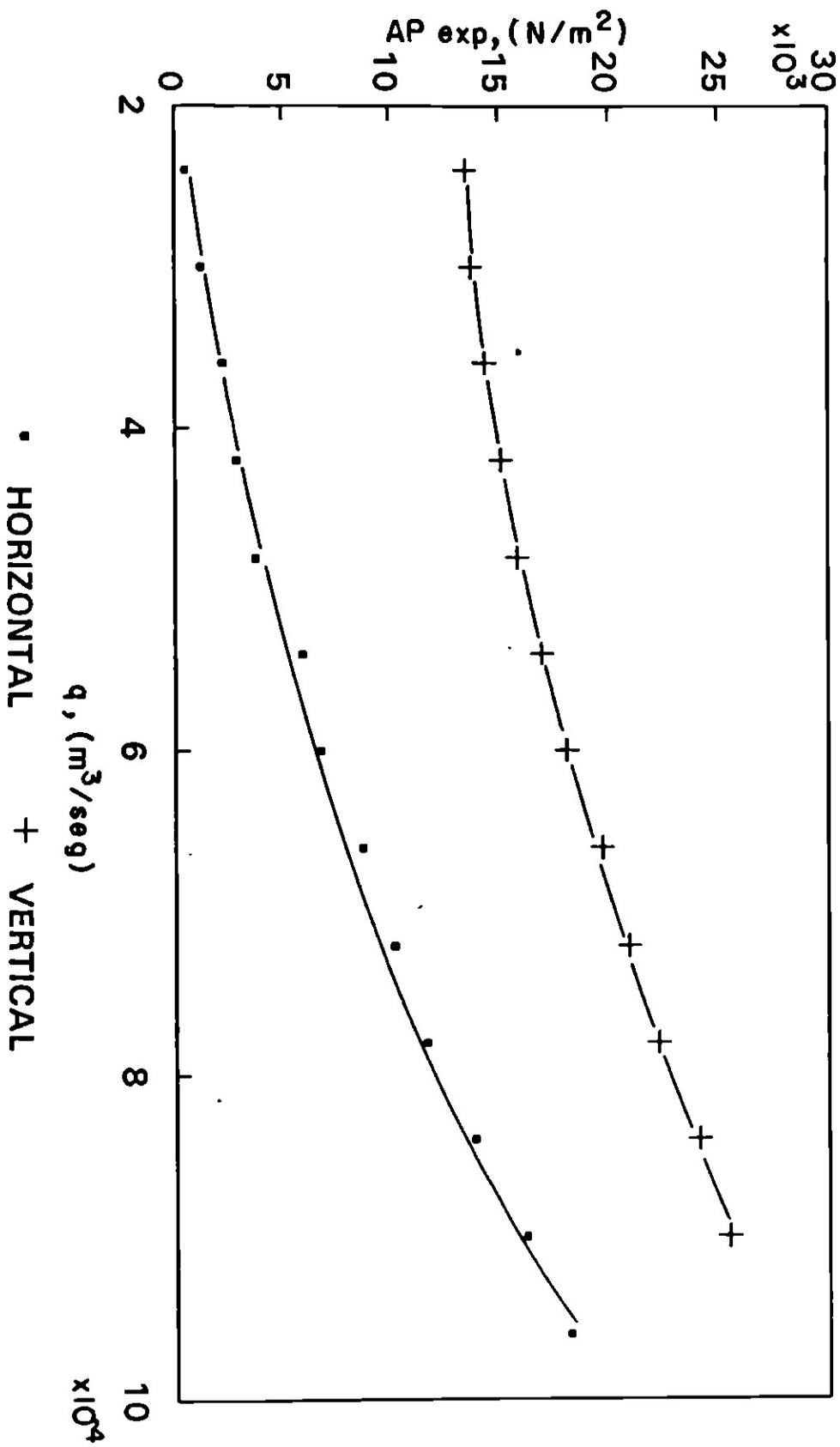
PRESION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION HORIZONTAL  
 T = 15 °C



PRESION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION VERTICAL  
 T = 15 °C



CAIDA DE PRESION VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION HORIZONTAL Y VERTICAL  
 T = 15 °C



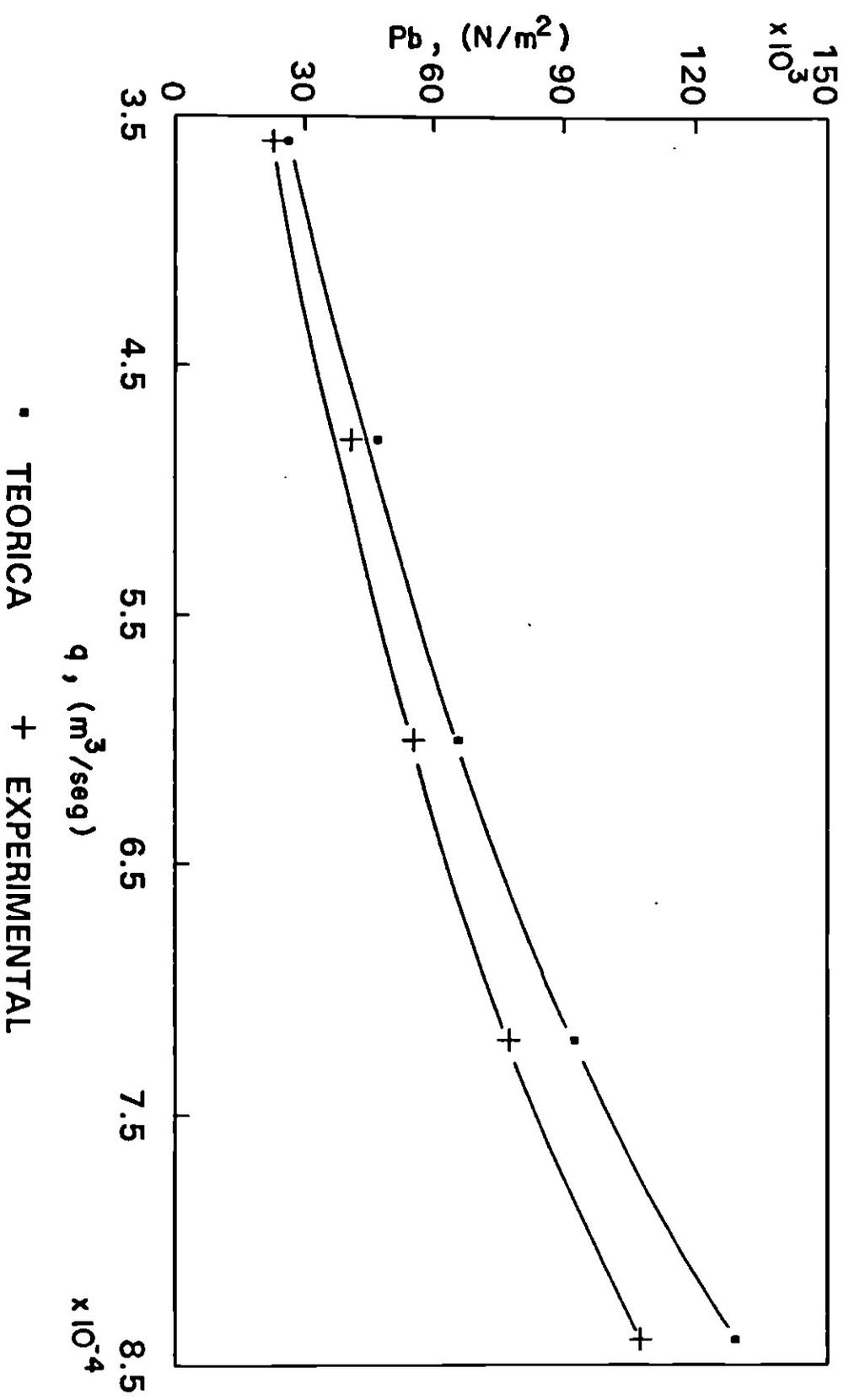
TEMPERATURA DE TRABAJO 17°C

| No. CORRIDA | % ROT | PRESION A           |       |                              | VEL. A                    |         | VEL. B  |         | ENERGIA CIN. A |       | ENERGIA CIN. B |          | ENERGIA POTENCIAL A |          | ENERGIA POTENCIAL B |       | PRESION B TEORICA |                  | DR EXPTAL.       |                  | PRESION B EXPTAL. |                  | HV J/Kgm |
|-------------|-------|---------------------|-------|------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|----------------|-------|----------------|----------|---------------------|----------|---------------------|-------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|----------|
|             |       | Kgf/cm <sup>2</sup> | DZ cm | DENSIDAD Kgm/cm <sup>3</sup> | GASTO m <sup>3</sup> /seg | m/seg   | m/seg   | J/Kgm   | J/Kgm          | J/Kgm | J/Kgm          | J/Kgm    | J/Kgm               | J/Kgm    | J/Kgm               | J/Kgm | J/Kgm             | N/m <sup>2</sup> | N/m <sup>2</sup> | N/m <sup>2</sup> | N/m <sup>2</sup>  | N/m <sup>2</sup> |          |
| 1           | 30    | 0.25                | 1.5   | 998.7952                     | 0.00036                   | 1.8961  | 0.27414 | 1.88565 | 0.037577       | 8.036 | 8.036          | 26162.18 | 1845.488            | 22670.9  | 3.49679             |       |                   |                  |                  |                  |                   |                  |          |
| 2           | 40    | 0.45                | 2.7   | 998.7952                     | 0.00048                   | 2.44815 | 0.36552 | 2.98671 | 0.0868         | 8.036 | 8.036          | 47056.35 | 3321.896            | 40807.08 | 6.25581             |       |                   |                  |                  |                  |                   |                  |          |
| 3           | 50    | 0.625               | 4.8   | 998.7952                     | 0.0006                    | 3.06018 | 0.45691 | 4.69236 | 0.10438        | 8.036 | 8.036          | 65862.69 | 5905.593            | 55384.64 | 10.49069            |       |                   |                  |                  |                  |                   |                  |          |
| 4           | 60    | 0.875               | 6.8   | 998.7952                     | 0.00072                   | 3.67222 | 0.54829 | 6.74259 | 0.15031        | 8.036 | 8.036          | 92390.68 | 8366.256            | 77440.07 | 14.98864            |       |                   |                  |                  |                  |                   |                  |          |
| 5           | 70    | 1.225               | 10.3  | 998.7952                     | 0.00084                   | 4.28425 | 0.63967 | 9.17742 | 0.20459        | 8.036 | 8.036          | 129090.9 | 12672.42            | 107456.5 | 21.66053            |       |                   |                  |                  |                  |                   |                  |          |

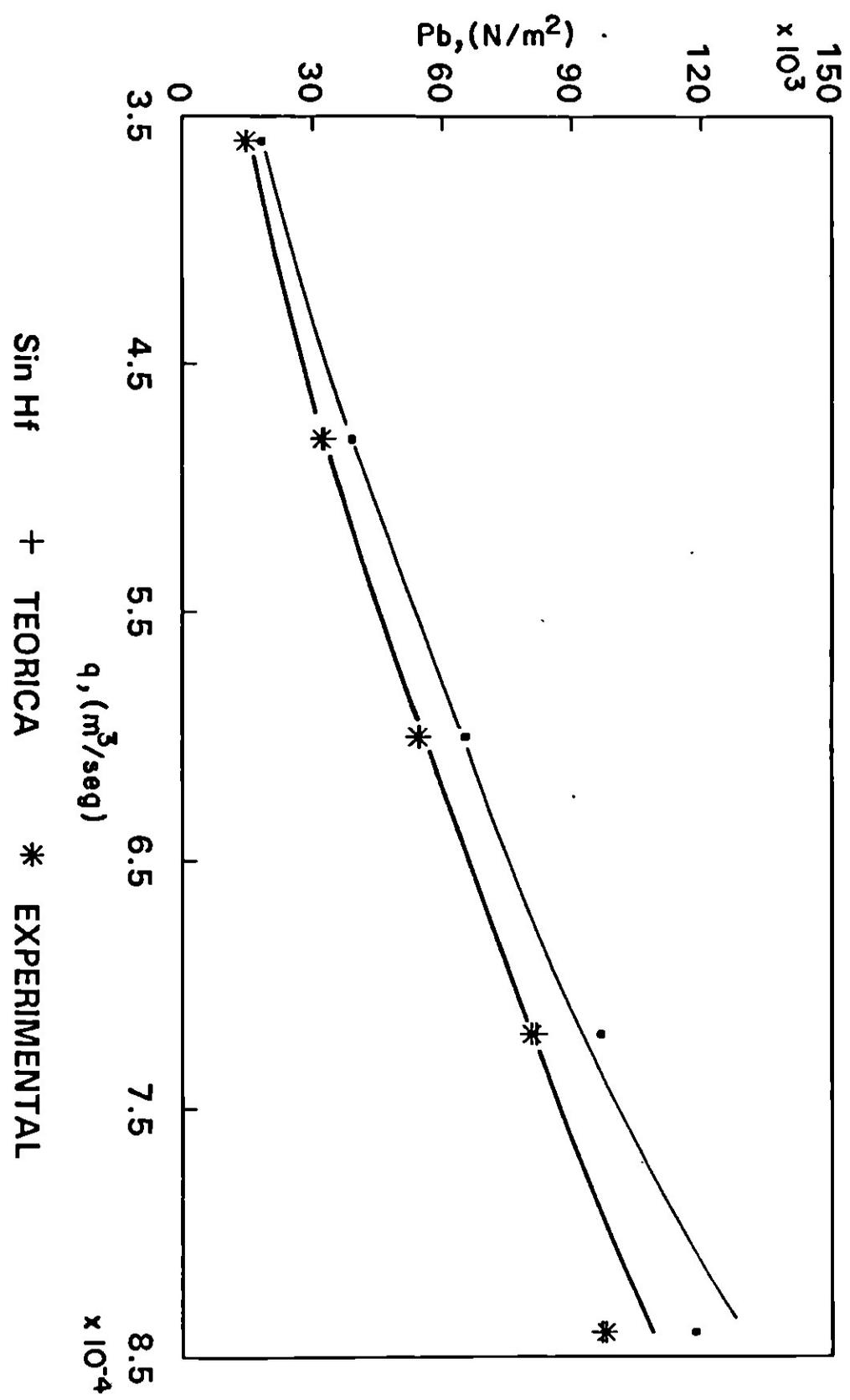
PRESION VERTICAL

| No. CORRIDA | PRESION A Kgf/cm <sup>2</sup> | DZ cm | ENERGIA POT. A J/Kgm | ENERGIA POT. B J/Kgm | PRESION B SIN HV N/m <sup>2</sup> | PRESION B TEORICA N/m <sup>2</sup> | DR EXPTAL. N/m <sup>2</sup> | PRESION B EXPTAL. N/m <sup>2</sup> | ERROR % |
|-------------|-------------------------------|-------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------|
|             |                               |       |                      |                      |                                   |                                    |                             |                                    |         |
| 1           | 0.3                           | 1.6   | 10.976               | 23.912               | 18144.98                          | 14653.4                            | 14868.95                    | 14530.37                           | 0.84    |
| 2           | 0.5                           | 3.2   | 10.976               | 23.912               | 38038.15                          | 32789.88                           | 16857.48                    | 32174.71                           | 1.87    |
| 3           | 0.75                          | 5.1   | 10.976               | 23.912               | 65200.32                          | 54722.28                           | 19195.11                    | 54353.17                           | 0.67    |
| 4           | 1.05                          | 7.5   | 10.976               | 23.912               | 96631.52                          | 81680.91                           | 22147.9                     | 80819.69                           | 1.05    |
| 5           | 1.25                          | 9.6   | 10.976               | 23.912               | 118622.1                          | 96987.63                           | 24731.6                     | 97848.67                           | -0.88   |

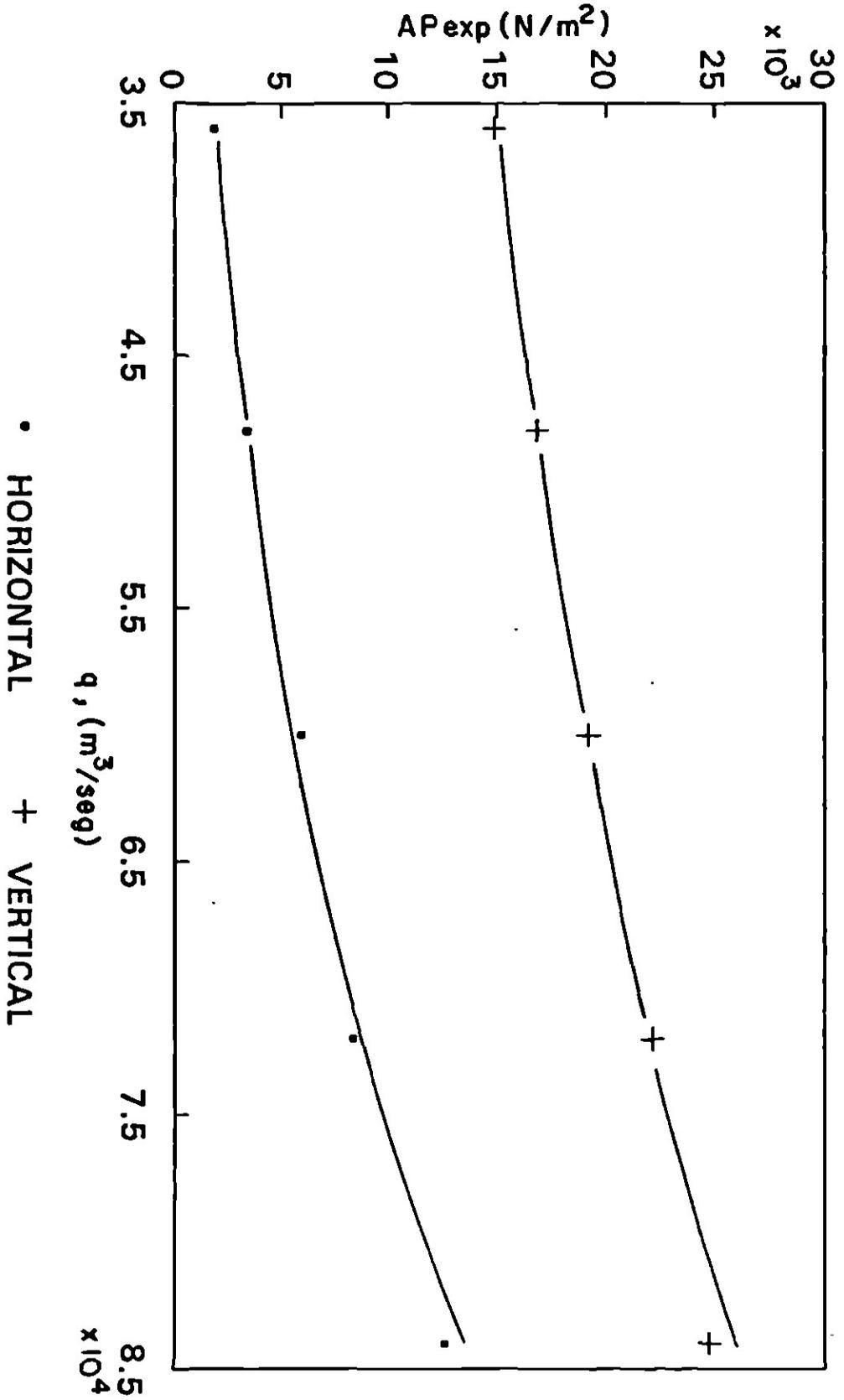
PRESION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION HORIZONTAL  
 T = 17 °C



PRESION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION VERTICAL  
 T = 17°C

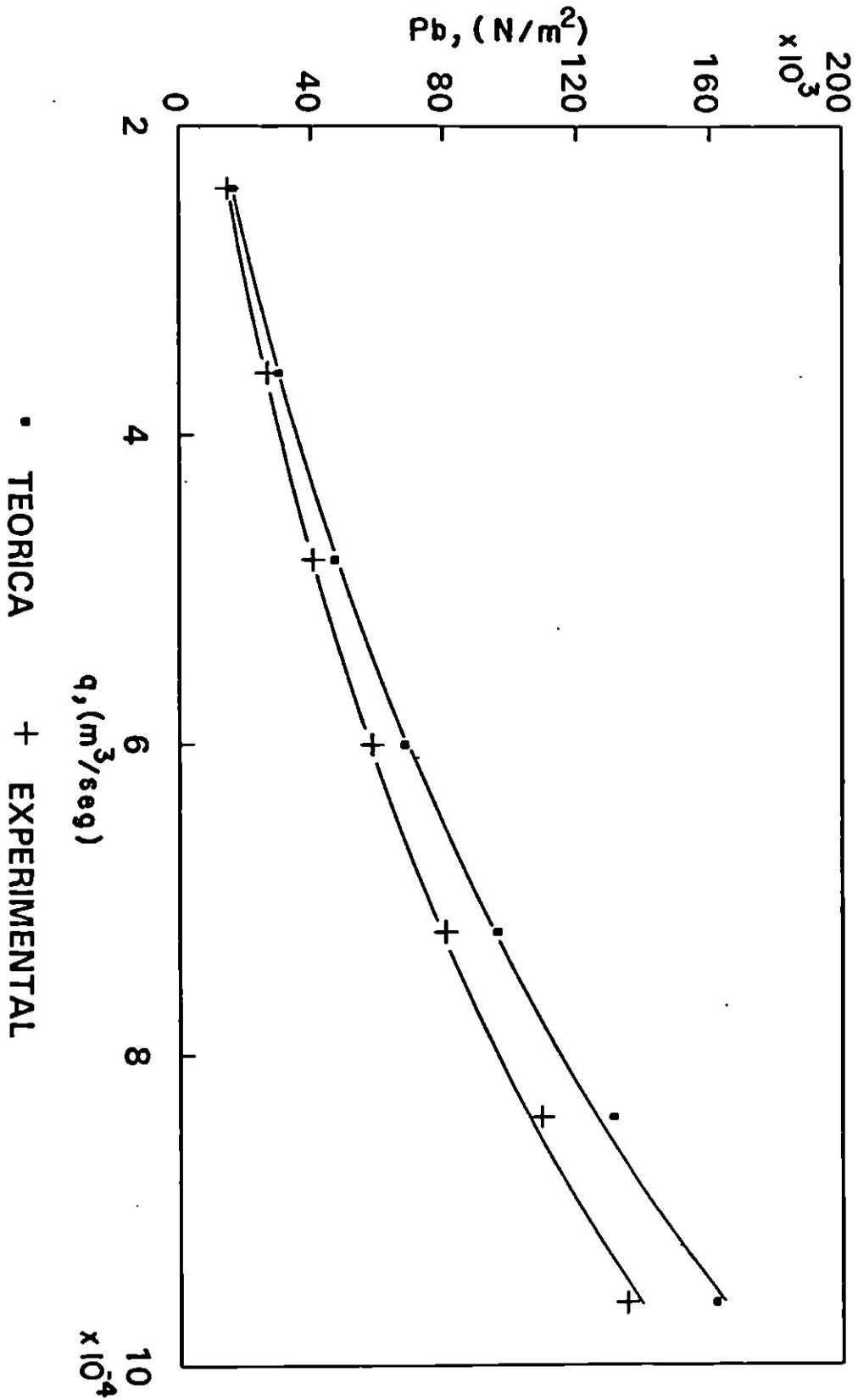


CAIDA DE PRESION VS GASTO VOLUMETRICO  
POSICION HORIZONTAL Y VERTICAL  
T = 17 °C

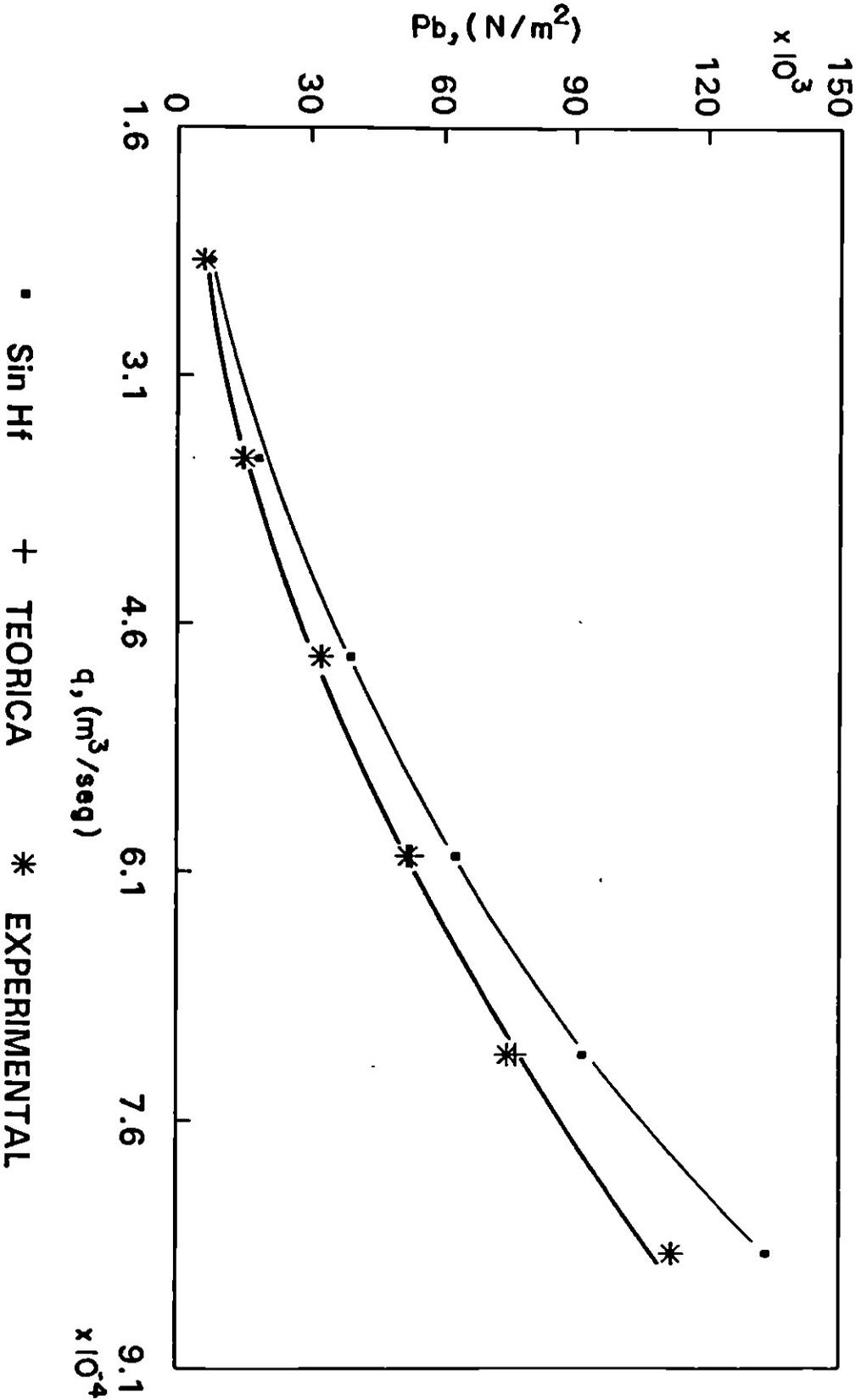




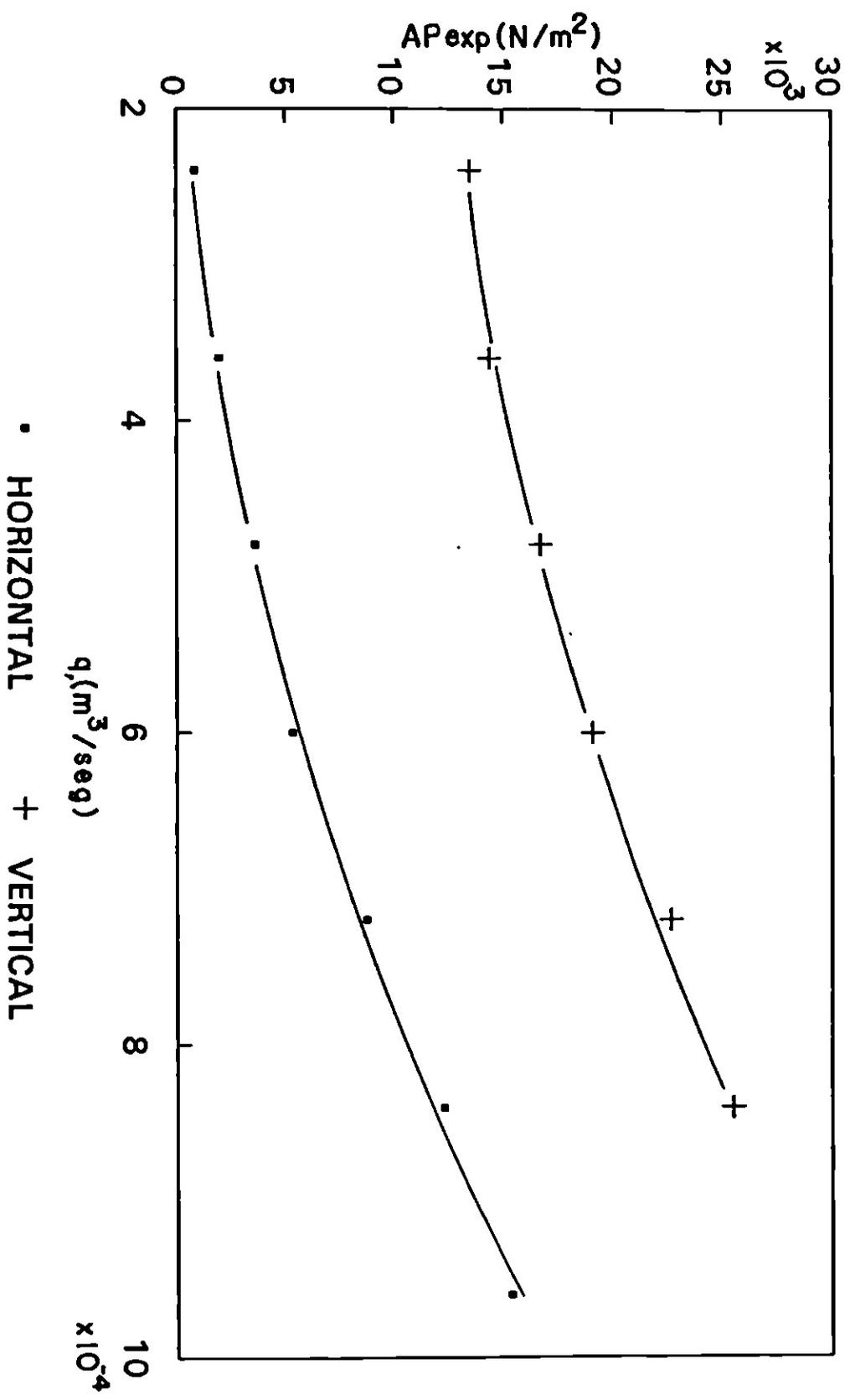
PRESSION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
POSICION HORIZONTAL  
T = 19 °C



PRESION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION VERTICAL  
 T = 19 °C



CAIDA DE PRESION VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION HORIZONTAL Y VERTICAL  
 T = 19 °C



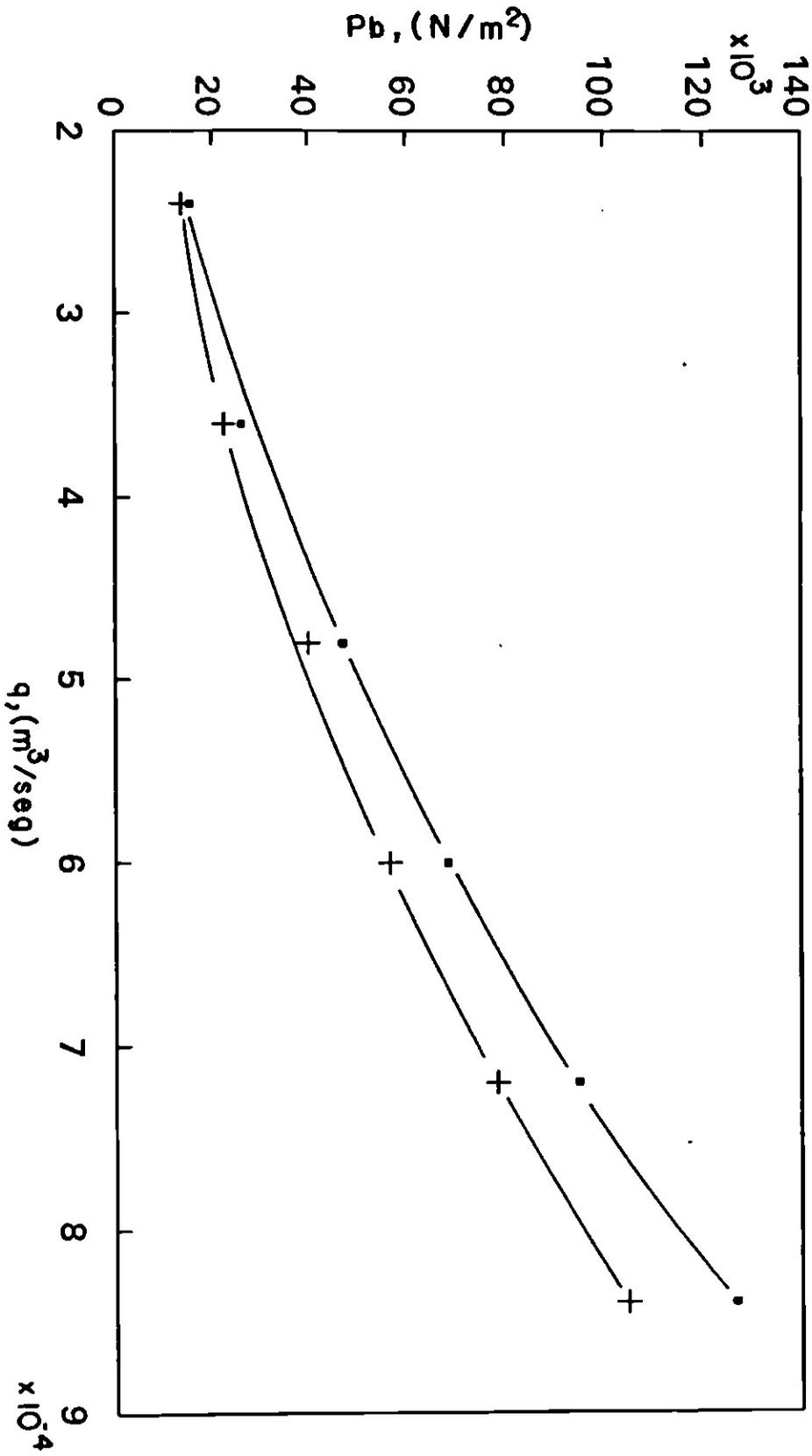
TEMPERATURA DE TRABAJO 20.8°C

| No. CORRIDA | % ROT | PRESION A           |                     | DZ cm    | DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup> | GASTO m <sup>3</sup> /seg | VEL. A  |         | VEL. B  |       | ENERGIA CIN. A |          | ENERGIA CIN. B |          | ENERGIA POTENCIAL A J/Kgm | ENERGIA POTENCIAL B J/Kgm | PRESION B TEORICA N/m <sup>2</sup> | DR EXPTAL. N/m <sup>2</sup> | PRESION B EXPTAL. N/m <sup>2</sup> | HM J/Kgm |
|-------------|-------|---------------------|---------------------|----------|----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|-------|----------------|----------|----------------|----------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------|
|             |       | Kgf/cm <sup>2</sup> | Kgf/cm <sup>2</sup> |          |                            |                           | m/seg   | m/seg   | J/Kgm   | J/Kgm | J/Kgm          | J/Kgm    |                |          |                           |                           |                                    |                             |                                    |          |
| 1           | 20    | 0.15                | 0.8                 | 998.1297 | 0.00024                    | 1.22407                   | 0.18276 | 0.74918 | 0.0167  | 8.036 | 8.036          | 15440.76 | 983.6437       | 13726.01 | 1.71796                   |                           |                                    |                             |                                    |          |
| 2           | 30    | 0.25                | 1.6                 | 998.1297 | 0.00036                    | 1.83611                   | 0.27414 | 1.88565 | 0.03758 | 8.036 | 8.036          | 26161.08 | 1967.287       | 22548.81 | 3.61904                   |                           |                                    |                             |                                    |          |
| 3           | 40    | 0.45                | 3.3                 | 998.1297 | 0.00048                    | 2.44815                   | 0.36552 | 2.98671 | 0.0668  | 8.036 | 8.036          | 47053.4  | 4057.53        | 40071.44 | 6.99504                   |                           |                                    |                             |                                    |          |
| 4           | 50    | 0.65                | 5.9                 | 998.1297 | 0.0006                     | 3.06018                   | 0.45691 | 4.86236 | 0.10438 | 8.036 | 8.036          | 68311.25 | 7131.417       | 56610.42 | 11.72275                  |                           |                                    |                             |                                    |          |
| 5           | 60    | 0.9                 | 8.1                 | 998.1297 | 0.00072                    | 3.67222                   | 0.54829 | 6.74259 | 0.15031 | 8.036 | 8.036          | 94837.89 | 9859.392       | 78298.55 | 16.57034                  |                           |                                    |                             |                                    |          |
| 6           | 70    | 1.2                 | 10.5                | 998.1297 | 0.00084                    | 4.28425                   | 0.63967 | 9.17742 | 0.20459 | 8.036 | 8.036          | 126633.3 | 12910.32       | 104766.9 | 21.90734                  |                           |                                    |                             |                                    |          |

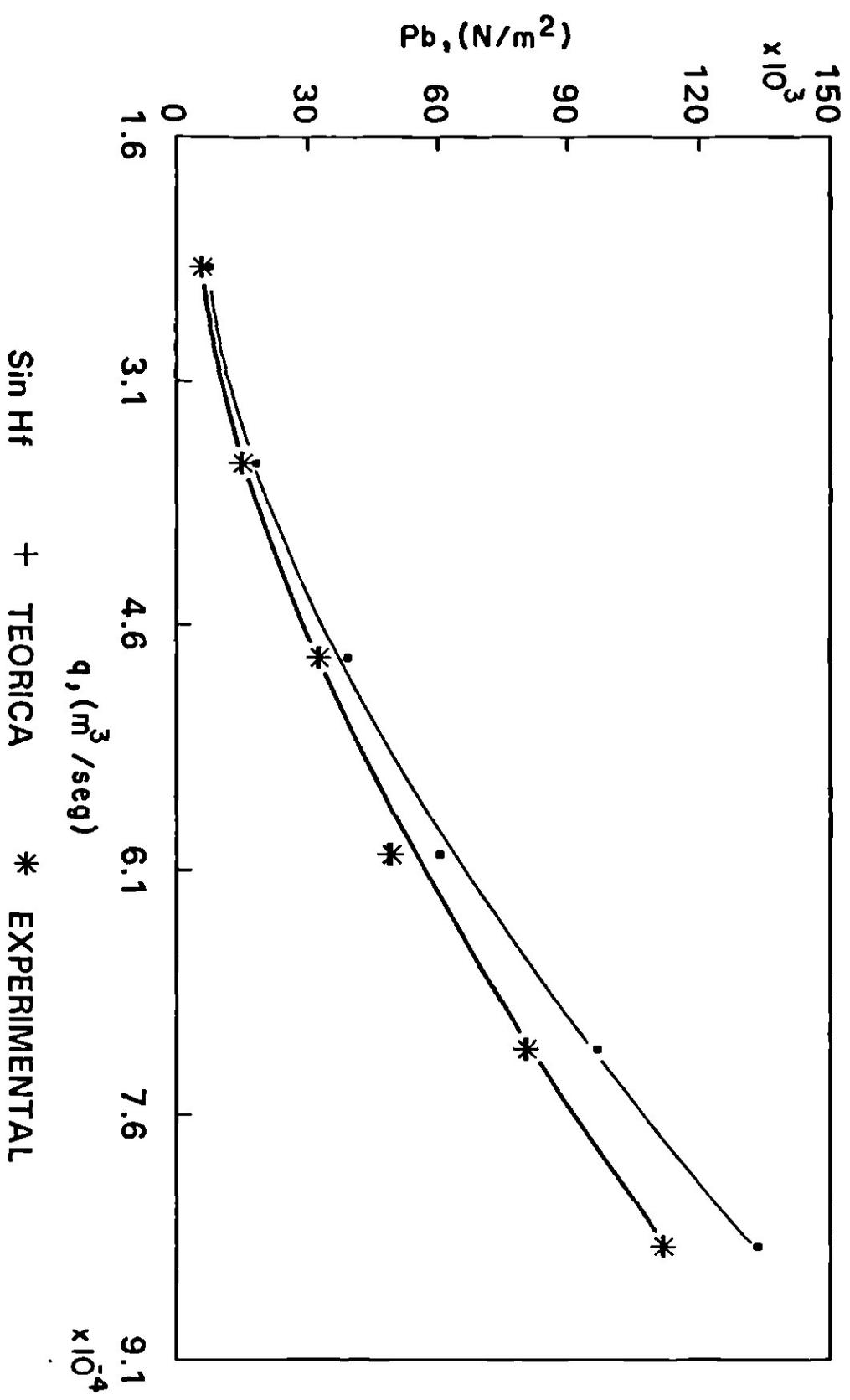
POSICION VERTICAL

| No. CORRIDA | PRESION A Kgf/cm <sup>2</sup> | DZ cm | ENERGIA POT. A J/Kgm | ENERGIA POT. B J/Kgm | PRESION B SIN HM N/m <sup>2</sup> | PRESION B TEORICA N/m <sup>2</sup> | DR EXPTAL. N/m <sup>2</sup> | PRESION B EXPTAL. N/m <sup>2</sup> | ERROR % |
|-------------|-------------------------------|-------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------|
|             |                               |       |                      |                      |                                   |                                    |                             |                                    |         |
| 2           | 0.3                           | 1.2   | 10.976               | 23.912               | 19152.49                          | 14540.22                           | 14387.27                    | 15032.04                           | -3.38   |
| 3           | 0.5                           | 2.8   | 10.976               | 23.912               | 39044.81                          | 32062.85                           | 16477.52                    | 32554.67                           | -1.53   |
| 4           | 0.7                           | 5.2   | 10.976               | 23.912               | 60302.66                          | 48601.85                           | 19306.49                    | 49339.58                           | -1.52   |
| 5           | 1.05                          | 7.7   | 10.976               | 23.912               | 96635.72                          | 80086.38                           | 22379.38                    | 80588.21                           | -0.61   |
| 6           | 1.4                           | 10.2  | 10.976               | 23.912               | 133334.4                          | 111468                             | 25453.26                    | 111836.9                           | -0.33   |

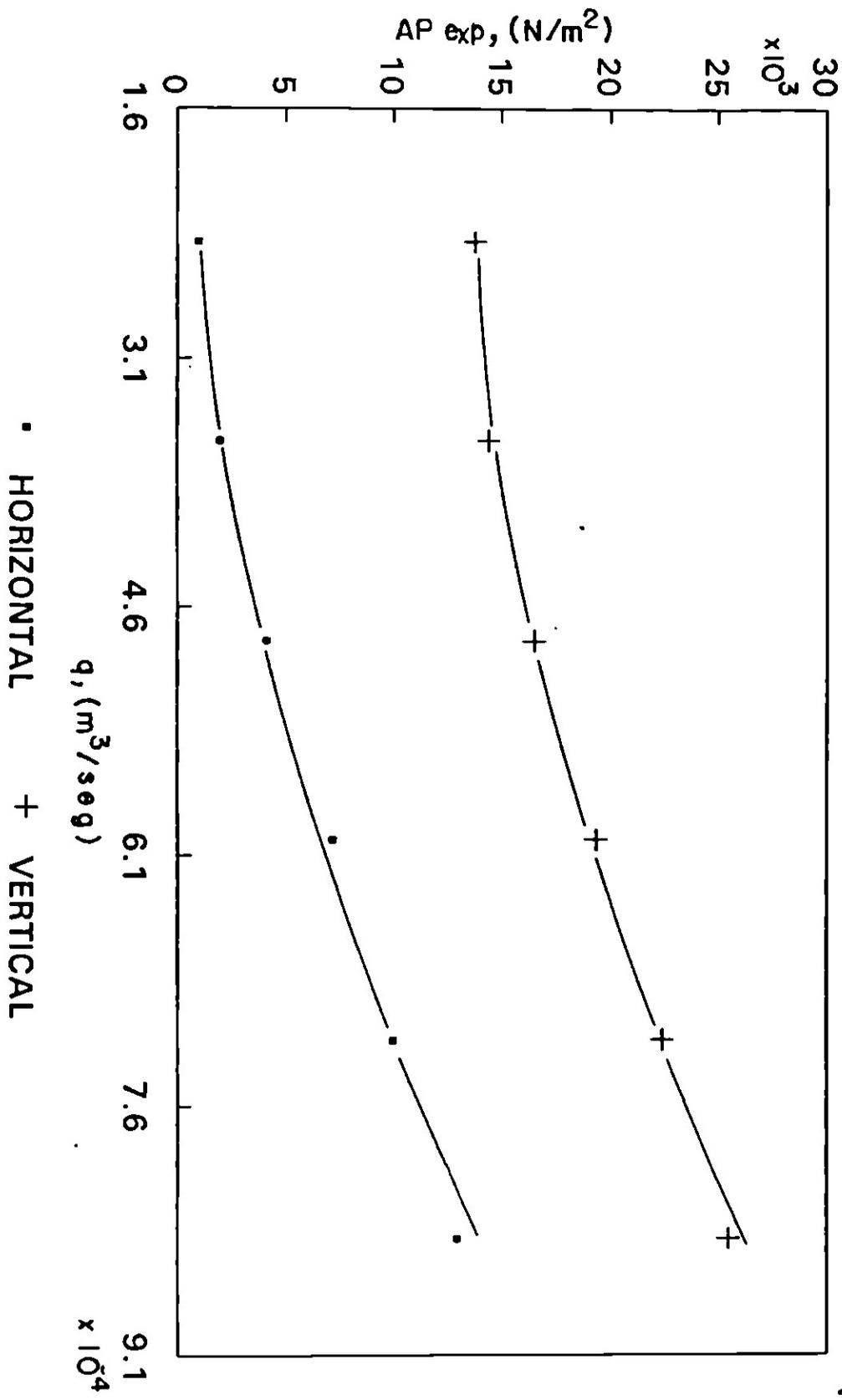
PRESION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION HORIZONTAL  
 T = 20.5 °C



PRESSION EN b VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION VERTICAL  
 T = 20.5 °C



CAIDA DE PRESION VS GASTO VOLUMETRICO  
 POSICION HORIZONTAL Y VERTICAL  
 T = 20.5 °C



## CAPITULO 5. CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos en las diferentes corridas realizadas a la misma temperatura y en la misma posición de tubería son reproducibles entre sí. Se concluye que el equipo es confiable y su utilización es adecuada para el propósito que se busca.

El porcentaje de error tan pequeño (con un máximo de 4%), entre la presión experimental en el punto b para la posición vertical, y la presión teórica para el mismo punto calculado a partir de la Ecuación de Bernoulli, demuestra la validez de esta ecuación en el rango de operación trabajado.

La simulación de la práctica para posiciones del tramo de medición, diferentes a la posición horizontal y vertical (con cualquier ángulo de inclinación) así como para fluidos diferentes al agua, ayuda a predecir resultados para condiciones diferentes a las del equipo instalado, lo que hace la práctica más didáctica.

El equipo se probó durante el último año, y demuestra claramente que su utilización facilita al alumno la comprensión de la Ecuación de Balance de Energía Mecánica.

## APENDICE A

PROGRAMA EN BASIC PARA CALCULOS DE LA PRACTICA, CON DOS FLUIDOS DIFERENTES AL AGUA.

```

10 SCREEN 0, 0, 0
20 .....
30 ''          APLICACION DE LA ECUACION DE BERNOULLI          ''
40 .....
50 KEY OFF: CLS
60 SCREEN 2
70 LINE (55, 33)-(605, 187), , B
80 LINE (50, 30)-(610, 190), , B: LINE (50, 175)-(30, 175)
90 LINE (30, 175)-(30, 15): LINE (30, 15)-(590, 15): LINE (590,15)-
    (590, 30): PAINT (37, 17)
100 LINE (30, 170)-(20, 170): LINE (20, 170)-(20, 10): LINE (20, 10)-
    (580, 10): LINE (580, 10)-(580, 15)
110 LINE (20, 165)-(10, 165): LINE (10, 165)-(10, 5): LINE (10, 5)-
    (570, 5): LINE (570, 5)-(570, 10): PAINT (15, 7)
120 LINE (10, 160)-(0, 160): LINE (0, 160)-(0, 0): LINE (0, 0)-(560,
    0): LINE (560, 0)-(560, 5)
130 LOCATE 8, 23: PRINT "UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI"
140 LOCATE 10, 28: PRINT "FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS"
150 LOCATE 12, 14: PRINT "LABORATORIO DE OP. DE TRANSF. DE LA CANTIDAD
    DE MOVIMIENTO"
160 LOCATE 15, 29: PRINT ""
170 LOCATE 17, 29: PRINT "BALANCE DE ENERGIA MECANICA"
180 LOCATE 19, 32: PRINT "ECUACION DE BERNOULLI "
190 LOCATE 22, 23: PRINT "Realizó: Alma Delia Montante Montelongo"
200 A$ = INPUT$(1)
210 CLS : SCREEN 0, 0, 0: COLOR 7, 0, 7
220 LOCATE 5, 5: PRINT "OPCIONES:"

```

```

230 LOCATE 7, 5: PRINT "1.- AGUA"
240 LOCATE 8, 5: PRINT "2.- GLICEROL "
250 LOCATE 9, 5: PRINT "3.- HEXANO"
270 A$ = INPUT$(1)
280 XXX = 0
290 IF A$ = "1" OR A$ = "2" OR A$ = "3" THEN 300 ELSE 270
300 ' INTRODUCCION DE DATOS EXPERIMENTALES
310 CLS
315 PRINT : PRINT : PRINT
320 LOCATE 9, 5: INPUT "% del ROTAMETRO = ", ROTAMETRO
330 LOCATE 10, 5: INPUT "TEMPERATURA (°C) = ", TEMPERATURA
340 IF XXX = 0 THEN 420
350 LOCATE 5, 5: PRINT "POSICION DE LA TUBERIA:"
360 LOCATE 7, 5: PRINT "a) VERTICAL (ANGULO = 90°)"
370 LOCATE 8, 5: PRINT "b) OTRO ANGULO"
380 R$ = INPUT$(1)
390 IF R$ = "A" OR R$ = "a" OR R$ = "B" OR R$ = "b" THEN 400 ELSE 380
400 IF R$ = "a" OR R$ = "A" THEN ANGULO = 90
410 IF R$ = "b" OR R$ = "B" THEN LOCATE 10, 5: INPUT "ANGULO (grados)
= ", ANGULO
420 LOCATE 11, 5: INPUT "PRESION EN EL PUNTO A (kgf / cm2) = ", PRESION
425 PRESION = PRESION * 98064.3739
430 LOCATE 12, 5: INPUT "Z (cm) = ", DELTAZ
435 DELTAZ = DELTAZ/100
440 ' INTRODUCCION DE DATOS CONOCIDOS
450 D1 = .0158
460 D2 = .04089
470 G = 9.8
490 DMERCURIO = (13.59509813 - .002471804511 * TEMPERATURA + 4.24983E-7
* TEMPERATURA ^ 2)*1000
500 A = VAL(A$)
510 ON A GOSUB 580, 610, 640
520 IF XXX = 0 THEN GOSUB 700 ELSE GOSUB 960
530 PRINT : PRINT : PRINT TAB(5); "REALIZACION DE CALCULO EN VERTICAL
O INCLINADO (S/N)?"

```

```

540 Q$ = INPUT$(1)
550 IF Q$ = "S" OR Q$ = "s" THEN CLS : GOTO 340
560 IF Q$ = "N" OR Q$ = "n" THEN SCREEN 0,0,0 : CLS : END
570 GOTO 540
580 ' ***** AGUA *****
590 DENSIDAD = (1.000191911 + .000007386990973 * TEMPERATURA - 5.267E-6
      * TEMPERATURA ^ 2)*1000
600 RETURN
610 ' ***** GLICEROL *****
620 DENSIDAD = (1.273347 - .0006132 * TEMPERATURA)*1000
630 RETURN
640 ' ***** HEXANO *****
645 ' La densidad esta a 20 °C, por falta de datos para correlacionar
650 DENSIDAD = 662
660 RETURN
700 ' *** POSICION HORIZONTAL ***
710 ALTURA = .82
720 GASTO = ROTAMETRO * 72 / 6/1000000
730 VEL1 = 4 * GASTO / 3.1415927 / D1 ^ 2
740 VEL2 = 4 * GASTO / 3.1415927 / D2 ^ 2
750 EC1 = VEL1 ^ 2 / 2
760 EC2 = VEL2 ^ 2 / 2
770 EP1 = ALTURA * G
780 EP2 = ALTURA * G
790 PB = (PRESION / DENSIDAD + EC1 - EC2) * DENSIDAD
800 PEXP = DELTAZ * (DMERCURIO - DENSIDAD) * G
810 PBEXP = PRESION - PEXP
820 HF = (PB - PBEXP) / DENSIDAD
825 LOCATE 13, 5: PRINT "DENSIDAD (kgm / m3) ="; DENSIDAD
830 LOCATE 14, 5: PRINT "GASTO VOL (m3 / s) ="; GASTO
840 LOCATE 15, 5: PRINT "VELOCIDAD A (m / s) ="; VEL1
850 LOCATE 16, 5: PRINT "VELOCIDAD B (m / s) ="; VEL2
860 LOCATE 17, 5: PRINT "ENERG CINET A (J / kgm) ="; EC1
870 LOCATE 18, 5: PRINT "ENERG CINET B (J / kgm) ="; EC2

```

```

880 LOCATE 19, 5: PRINT "ENERG POTEN A (J / kgm) ="; EP1
890 LOCATE 20, 5: PRINT "ENERG POTEN B (J / kgm) ="; EP2
900 LOCATE 21, 5: PRINT "PRESION B TEORICA (N / m2) ="; PB
910 LOCATE 22, 5: PRINT "PEXP (N / m2)="; PEXP
920 LOCATE 23, 5: PRINT "PRESION B EXPERIMENTAL (N / m2) ="; PBEXP
930 LOCATE 24, 5: PRINT "PERDIDAS POR FRICCION (J / kgm) ="; HF
940 XXX = -1
950 RETURN
960 ' *** POSICION VERTICAL ***
970 ZA = 1.12
980 ZB = 2.44 * SIN(ANGULO * 3.1415927 / 180)
990 EP1 = ZA * G
1000 EP2 = ZB * G
1010 PB1 = (PRESION / DENSIDAD + EC1 + EP1 - EC2 - EP2) * DENSIDAD
1020 PB2 = (PRESION / DENSIDAD + EC1 + EP1 - EC2 - EP2 - HF) *
DENSIDAD
1030 PEXP = DELTAZ * (DMERCURIO) * G + G * (ZB - ZA - DELTAZ) *
DENSIDAD
1040 PBEXP = PRESION - PEXP
1050 PORCIENTO = (PB2 - PBEXP) / PB2 * 100
1060 LOCATE 13, 5: PRINT "ENERG POTEN A (J / kgm) ="; EP1
1070 LOCATE 14, 5: PRINT "ENERG POTEN B (J / kgm) ="; EP2
1080 LOCATE 15, 5: PRINT "PRESION B SIN Hf (N / m2) ="; PB1
1090 LOCATE 16, 5: PRINT "PRESION B TEORICA (N / m2) ="; PB2
1100 LOCATE 17, 5: PRINT "PEXP (N / m2) ="; PEXP
1110 LOCATE 18, 5: PRINT "PRESION B EXPERIMENTAL (N / m2)="; PBEXP
1120 LOCATE 19, 5: PRINT "% ERROR ="; PORCIENTO
1130 RETURN

```

## APENDICE B.

### BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION A LA TERMODINAMICA EN INGENIERIA QUIMICA  
SMITH-VAN NESS  
CUARTA EDICION  
EDITORIAL MC. GRAW HILL, MEXICO, 1989.

MECANICA DE FLUIDOS  
BERNARD STANFORD MASSEY  
3a. EDICION (1a. EDICION EN ESPAÑOL)  
CIA. EDITORIAL CONTINENTAL, S. A. DE MEXICO, 1979.

OPERACIONES BASICAS DE INGENIERIA QUIMICA  
MC. CABE W. L., SMITH J. C. Y HARRIOTT P.  
CUARTA EDICION  
MC. GRAW HILL, ESPAÑA, 1991.

BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUIMICO  
PERRY R. H. Y CECIL H. CHILTON  
5a. EDICION (2a. EDICION EN ESPAÑOL)  
EDITORIAL MC. GRAW HILL, MEXICO, 1988.