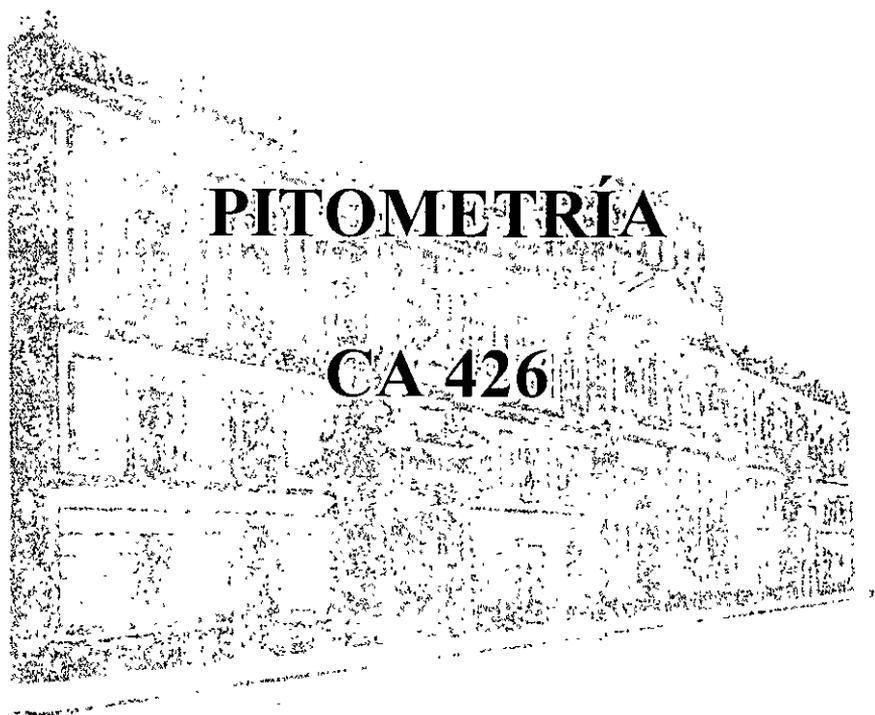




**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**



PITOMETRÍA

CA 426

**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

INTRODUCCIÓN

¿Para qué medir?

Principalmente, para obtener información que apoye la toma de decisiones en la operación, el mantenimiento y la administración de los servicios de agua prestados, y mejorar su funcionamiento. Asimismo, es la base para llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Obtener la dotación “per-cápita”.
2. Analizar la disponibilidad respecto a la demanda.
3. Conocer las presiones y niveles del agua en puntos significativos del sistema.
4. Controlar la presión del servicio para que sea homogénea y suficiente en las diferentes zonas del sistema.
5. Evaluación de la calidad del servicio.
6. Planeación de programas de mantenimiento preventivo y correctivo.
7. Determinar el tiempo de saturación de los sistemas en función del crecimiento demográfico y de la evolución socioeconómica y cultural de las comunidades.
8. Determinar los componentes de pérdidas en la infraestructura del sistema.
9. Evaluar otros sistemas de medición.

¿Cada cuándo se debe medir?

Las mediciones se deben realizar todo el tiempo; sin embargo, dependiendo del tipo de medidor instalado, se podrán tener datos continuos o datos periódicos.

¿Qué es lo que se debe medir en los sistemas hidráulicos?

Principalmente los caudales captados, conducidos y distribuidos, así como la presión y elevaciones del agua, en puntos significativos de los sistemas hidráulicos.

En consecuencia, se han ideado diversos métodos de medición del flujo acordes con las características y necesidades de cada caso particular. Los hay desde los más complicados y costosos, generalmente empleados en laboratorios, hasta los más sencillos, prácticos y económicos, usados para estimaciones aproximadas. El método más adecuado depende de la magnitud del flujo y de la exactitud deseada. Una primera clasificación de las técnicas de medición más usuales en canales con flujo a superficie libre es la siguiente:

- a).- Método sección de control (estructuras de aforo).
- b).- Método sección-pendiente
- c).- Método de sección-velocidad.
- d).- Método de dilución.

Todos estos procedimientos tienen la característica común de que permiten establecer una relación entre el gasto y el o los niveles de la superficie del agua en determinadas secciones, aunque esto se hace en formas diferentes para cada uno, y los resultados observados tienen diversos grados de exactitud.

Antes de pasar a estudiar en detalle las características de cada método de medición, en el siguiente capítulo se definen los términos técnicos que se utilizan en el presente curso.

1.- DEFINICIONES.

SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.

Es un conjunto funcional de obras, instalaciones, tuberías, equipos, accesorios y servicios destinados a proveer de agua potable en condiciones de cantidad, calidad, continuidad y seguridad a los usuarios.

UNIDAD OPERACIONAL (UO)

Es una parte del sistema de abastecimiento de agua que realiza total o parcialmente una de las siguientes funciones: captación, conducción, bombeo, tratamiento, almacenamiento y distribución del agua.

SISTEMA DE PRODUCCIÓN

Es la parte del sistema de abastecimiento de agua que comprende a todas las unidades operacionales situadas aguas arriba de la salida de las instalaciones de tratamiento, ya sea que estén constituidas por estaciones de tratamiento o simples puestos de desinfección, o cualquier instalación para potabilizar el agua.

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

Es la parte del sistema de abastecimiento de agua ubicada entre los puntos a partir de los cuales el agua se torna potable (salida de plantas de tratamiento, unidades de desinfección) y los puntos de utilización del agua en las instalaciones prediales. El sistema de distribución comprende el sistema público de distribución y el sistema predial.

SISTEMA PREDIAL

Es la parte del sistema de distribución que pertenece a los consumidores. Está compuesto por el conjunto de instalaciones prediales conectadas al sistema público de distribución de agua.

SISTEMA DE ALCANTARILLADO

Es un conjunto funcional de obras, instalaciones, tuberías, equipos, accesorios y servicios destinados a recibir y conducir, en forma segura, el agua residual y/o pluvial, desde un sistema predial hasta las plantas de tratamiento.

LÍNEA DE CONDUCCIÓN

Se denomina línea de conducción a la parte del sistema constituido por el conjunto de ductos (tuberías o canales) y accesorios destinados a transportar el agua desde donde se encuentra en estado natural (captación), hasta un punto que puede ser un tanque de almacenamiento o bien

una planta potabilizadora. La conducción comprende estructuras como son los canales a cielo abierto, acueductos y estaciones de bombeo.

OBRAS DE CAPTACIÓN

Es el conjunto de estructuras y equipos que sirven para extraer las aguas aprovechables de los distintos tipos de fuentes donde se encuentra de forma natural.

PLANTAS DE TRATAMIENTO

Son las estaciones donde se llevan a cabo una serie de procesos que le dan al agua la calidad requerida para el consumidor final.

ZONAS DE PRESIÓN

Es cada una de las áreas en que se subdivide un sistema de distribución, previendo mantener presiones homogéneas y entre valores prefijados.

TANQUE DE DISTRIBUCIÓN

Es el elemento del sistema de distribución destinado a regularizar los caudales producidos para satisfacer las demandas a cualquier hora, prevé condiciones de abastecimiento continuo durante períodos cortos de paros del sistema de producción y acondiciona las presiones en la red de distribución.

ESTACIÓN DE BOMBEO

Es la instalación que permite trasladar y elevar el agua hasta los tanques de distribución.

SISTEMA DE MACROMEDICIÓN

Es el conjunto de equipos, elementos y actividades permanentes para obtener, procesar, analizar y divulgar los datos de rutina de un sistema hidráulico, relativos a caudales, volúmenes, presiones y niveles de agua.

MASA DE UN CUERPO (M).

Es igual a la fuerza necesaria para transferirle (al cuerpo), una unidad de aceleración, se expresa en unidades de $kg\text{-seg}^2/m$; para una sustancia en particular, la relación es constante. Para cada sustancia dicha relación es diferente.

$$Masa = M = \frac{Fuerza}{aceleración} = constante$$

DENSIDAD (ρ).

Es la masa (M), contenida en la unidad de volumen (V), se expresa en unidades de $kg\text{-seg}^2/m^4$, y varía con la temperatura y con la presión.

$$Densidad = \rho = \frac{Masa}{volumen}$$

PESO ESPECÍFICO (γ).

Es el peso de un cuerpo por unidad de volumen, se expresa en unidades de kg/m^3 .

$$Peso\ específico = \gamma = \frac{Peso}{volumen} = \rho \times g$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, cuyo valor estándar es $9.81\ m/seg^2$, al nivel del mar.

FUERZA (F).

Es el producto de la masa por la aceleración, se expresa en unidades de kg .

$$Fuerza = F = Masa \times aceleración$$

TRABAJO (W).

Es la energía transferida de un sistema a otro y es igual al producto de la fuerza por la distancia recorrida entre los dos sistemas. Se expresa en unidades de $kg\cdot m$.

$$Trabajo = W = Fuerza \times distancia$$

En el caso de un volumen de agua, la masa, M , se expresa como $M = \rho \times V$, donde V , es el volumen elemental de agua.

ENERGÍA (E).

Es la capacidad que posee un cuerpo para realizar un trabajo, se expresa en unidades de $kg\cdot m$ o en kilowatts-hora.

GASTO O CAUDAL (Q).

Es el flujo de un volumen que pasa a través de un área determinada, se expresa en unidades de m^3/seg o $litros/seg$.

$$Gasto = Q = \frac{volumen}{tiempo} = Velocidad \times Área$$

POTENCIA (P).

Es la relación de la energía transferida o trabajo realizado, por unidad de tiempo, se expresa en unidades de $kg\cdot m/seg$ o en kilowatts (kw). Para sistemas hidráulicos se expresa como sigue:

$$Potencia = P = \gamma Q H$$

Donde H es la altura, medida en metros, a la que se desplaza un volumen de agua.

PRESIÓN

Es una fuerza por unidad de superficie; es independiente del área utilizada para definirla y es función solamente de su posición relativa. En la fórmula (1.1), se puede ver que es el peso del agua (fuerza F), sobre el fondo (superficie A), del depósito.

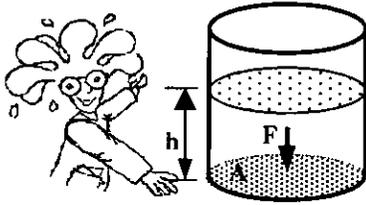


Figura 1.1 Concepto de presión

$$p = \text{presión} = F/A = h \times \gamma, \text{ en } \text{kg}/\text{m}^2. \quad (1.1)$$

Donde:

F = peso del agua = $A \times h \times \gamma$, en kg .

A = área, en m^2 .

h = altura del agua, en m .

γ = peso específico del agua, en kg/m^3 .

En la ecuación (1) la presión p , depende de la profundidad o tirante h , cuando el agua está en reposo; por esto, al tirante h , se le llama carga estática y a p , presión estática.

La presión no se ejerce sólo hacia abajo, el agua también ejerce una presión hacia arriba sobre el tapón T de la ilustración, por efecto de la columna AB que queda por encima del nivel de la boca cerrada del tapón.

El efecto de la columna BC queda equilibrada por la acción de la columna simétrica ED. Por lo tanto, Si $AB = h$, la presión p sobre el tapón T, se expresa de nuevo por la fórmula (1).

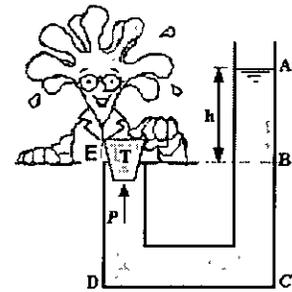


Figura 1.2 La presión es una magnitud escalar.

De acuerdo con lo anterior, la presión no depende de la forma ni de la existencia de un fondo o de una superficie sólida que la reciba; es decir, que es independiente del área utilizada para definirla.

En conclusión, la presión es solo una magnitud, por lo tanto carece de sentido decir que la presión actúa en cualquier dirección; puesto que no se tienen componentes de dirección y sentido en un sistema de coordenadas.

PRESIÓN ABSOLUTA

Es la presión que tiene como referencia la presión cero; la presión cero sólo existe en el vacío.

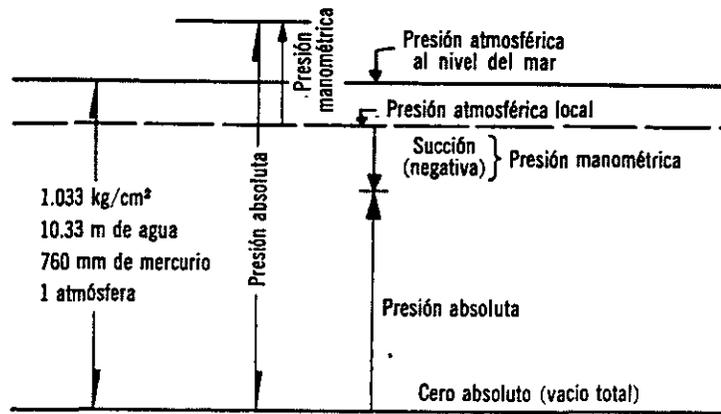
PRESIÓN RELATIVA O MANOMÉTRICA

Es la presión que tiene como referencia la presión atmosférica del lugar donde se hace la medición; o también, es la diferencia que hay entre la presión en un punto del fluido y la presión atmosférica.

PRESIÓN DIFERENCIAL

Es la diferencia de presión medida entre dos puntos, tomando como referencia uno de ellos; generalmente la referencia es la presión en el punto que queda aguas arriba.

De lo anterior, se concluye que la presión p en un punto de un fluido se puede expresar en términos de la altura h de la columna del fluido que causa la presión. Por lo tanto, si γ es el peso específico del fluido, $p = \gamma h$ y a la altura h se le llama carga de presión en ese punto.



principio de continuidad o conservación de la masa, el cual establece que: en un sistema, la suma algebraica del volumen que entra menos el volumen que sale debe ser igual a la variación en el volumen almacenado (+ o -).

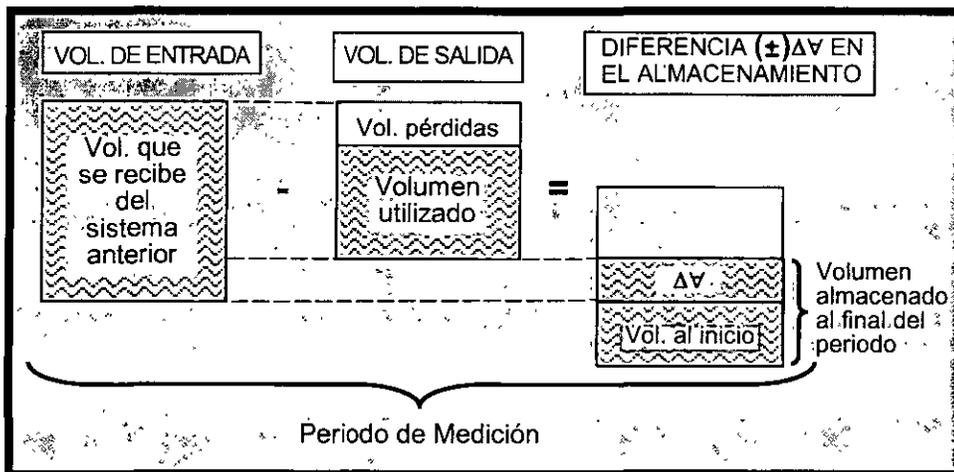


Figura 1.3 Balance de agua y principio de continuidad

El principio de continuidad aplicado entre dos secciones de una conducción con flujo permanente y donde no varía su almacenamiento, queda expresado por la siguiente fórmula:

$$Q = v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 = \text{constante} \quad (1.2)$$

V es la velocidad del flujo (m/s); A es el área de la sección que atraviesa el flujo (m^2); y Q es el caudal o gasto en esa sección (m^3/s), los subíndices indican la posición en dos puntos diferentes del flujo o de la estructura de conducción -tubería o canal.

Puede verse que si las unidades de velocidad son metros/segundo (m/s) y del área son metros cuadrados (m^2), entonces las unidades del caudal son: metros cúbicos/segundo (m^3/s), o sea, volumen por unidad de tiempo.

En la fórmula (2) obsérvese que si Q es constante y A_1 es mayor que A_2 , entonces v_2 debe ser mayor que v_1 en una proporción igual a (A_1/A_2) , para mantener la igualdad o el equilibrio, esto es: $v_2 = (A_1/A_2) \times v_1$ o también: $v_1 = (A_2/A_1) \times v_2$

Ejemplo: Sea $Q = 0.12 m^3/s$, $A_1 = 0.0729 m^2$, $A_2 = 0.0506 m^2$, despejando de la fórmula (2)

$$v_1 = Q/A_1 = 0.12/0.0729 = 1.64 m/s$$

$$v_2 = Q/A_2 = 0.12/0.0506 = 2.37 m/s, \text{ o bien}$$

$$v_2 = (A_1/A_2) \times v_1 = (0.0729/0.0506) \times 1.64 = 2.37 m/s$$

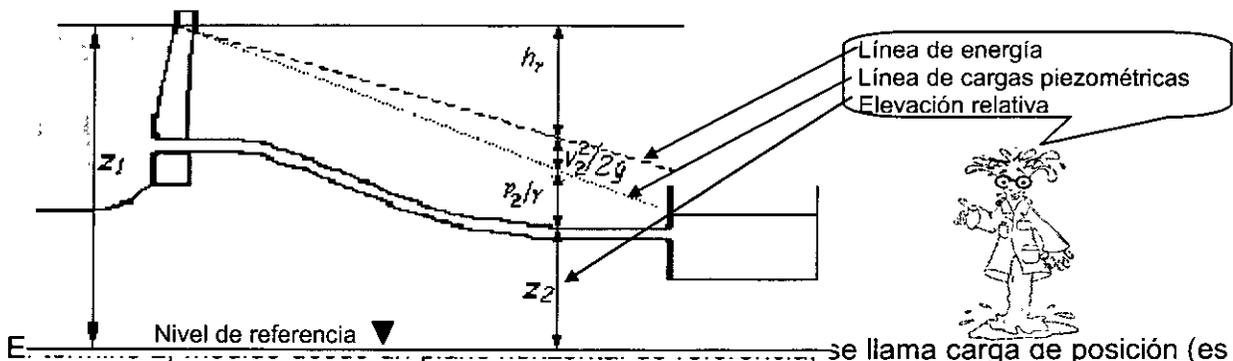
1.3 ¿Qué es el gradiente hidráulico?

Es la proporción o tasa de cambio (aumento o disminución) de la energía hidráulica al variar alguno de sus componentes con el tiempo o la longitud.

La energía hidráulica está expresada por la fórmula de la energía o también conocida como ecuación de Bernoulli; la cual, aplicada entre dos secciones de una conducción es la siguiente:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_r \tag{1.3}$$

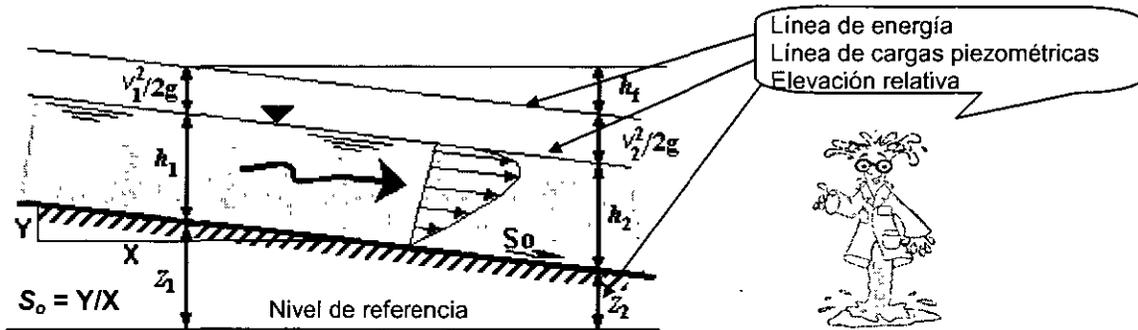
Nótese que las unidades que se manejan en esta ecuación son metros de columna de agua.



se llama carga de posición (es energía potencial), p/γ es la carga de presión (es energía generada por el trabajo mecánico), $v^2/2g$, es la carga de velocidad (es energía cinética), y la pérdida de carga o de energía

(energía que sale del sistema –transferencia de calor–, es $h_r = f (L/D) (v^2/2g)$; D, es el diámetro interior de la tubería.

Cuando la ecuación de Bernoulli se aplica a canales con pendiente o declive, S_o , menor a 0.01 y flujo uniforme, queda de la siguiente manera:



Es importante observar en la fórmula (3) que para una conducción, donde Z_1 , Z_2 , A_1 , A_2 , γ y $2g$ son constantes, si el gasto Q disminuye; las velocidades v_1 y v_2 deben disminuir –de acuerdo con la fórmula (2)– por lo tanto la presión debe aumentar proporcionalmente. Esto sucede, por ejemplo, cuando se cierra una válvula en la descarga de la tubería; véase la gráfica 1.1.

Ejemplo:

Sea $Q = 0.0235 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_1 = 36.0 \text{ m}$, $Z_2 = 12.0 \text{ m}$, la longitud de la tubería entre la sección 1 y 2, $L = 980 \text{ m}$, el coeficiente de pérdidas, $f = 0.025$, $D = 150 \text{ mm}$ y $A_1 = A_2 = 0.0177 \text{ m}^2$, con la fórmula (2) se despeja v_1 y v_2

$$v_1 = v_2 = Q/A_2 = 0.0235/0.0177 = 1.33 \text{ m/s}$$

$$(v_2^2/2g) = 1.33^2/(2 \times 9.81) = 0.0901 \text{ m}$$

$$h_r = f(L/D) (v_2^2/2g) = 0.025 (980/0.150) (0.0901) = 14.72 \text{ m}$$

con la ecuación (3) se despeja la presión

$$p_2 = \gamma (Z_1 - Z_2 - h_r - v_2^2/2g) = 1000 (36 - 12 - 14.72 - 0.0901) = 9,189.9 \text{ kg/m}^2$$

Esta presión equivale a:

$$p_2 = 0.91899 \text{ kg/cm}^2 = 9.1899 \text{ mca (metros columna de agua)}$$

2.- UNIDADES Y FACTORES DE CONVERSIÓN.

En los trabajos que tienen que ver con el agua, es muy importante conocer las unidades básicas, así como las derivadas de estas últimas y sus equivalencias, para comprender mejor el significado físico que representan y se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Unidades de medida básicas en el SI (Sistema Internacional)

MAGNITUD	UNIDAD DE MEDIDA	SÍMBOLO	DERIVACIÓN
LONGITUD (<i>l</i>)	metro	<i>m</i>	
FUERZA – peso – (<i>F</i>)	kilogramo (fuerza)	<i>kg</i>	$F = \text{masa} \times g$
TIEMPO (<i>t</i>)	segundo	<i>s</i>	
SUPERFICIE – área– (<i>A</i>)	metro cuadrado	m^2	
VOLUMEN (<i>V</i>)	metro cúbico	m^3	
VELOCIDAD (<i>v</i>)	metro por segundo	<i>m/s</i>	$v = l / t$
ACELERACIÓN (<i>a, g</i>)	metro por segundo cuadrado	m/s^2	$a = v / t$
PESO ESPECÍFICO (<i>γ</i>)	kilogramo por metro cúbico	kg/m^3	$\gamma = \text{densidad} \times g$
PRESIÓN (<i>p</i>)	kilogramo por metro cuadrado	kg/m^2	$p = F / A$
GASTO – caudal – (<i>Q</i>)	metro cúbico por segundo	m^3/s	$Q = V / t$

Los múltiplos y submúltiplos de las unidades de medida, se expresan por medio de prefijos que indican el factor de conversión correspondiente; los de mayor uso son los que se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Prefijos usados con las unidades de medida básicas

PRÉFIJO	SÍMBOLO	FACTOR	EJEMPLO
mega	M	1 000 000	<i>Ml</i> megalitro = 1 000 000 litros <i>Mw</i> Megawatt = 1 000 000 watts
kilo	k	1 000	<i>km</i> kilómetro = 1 000 metros <i>kg</i> kilogramo = 1 000 gramos
hecto	h	100	<i>hm</i> hectómetro = 100 metros <i>hl</i> hectolitro = 100 litros
deca	da	10	<i>dam</i> decámetro = 10 metros <i>dal</i> decalitro = 10 litros
deci	d	0.1	<i>dm</i> decímetro = 0.1 metro <i>dl</i> decilitro = 0.1 litro
centi	c	0.01	<i>cm</i> centímetro = 0.01 metro <i>cl</i> centilitro = 0.01 litro
mili	m	0.001	<i>mm</i> milímetro = 0.001 metro <i>ml</i> mililitro = 0.001 litro

micro	μ	0.000 001	μm micrómetro = 0.000 001 metro μg microgramo = 0.000 001 gramo
-------	-------	-----------	--

La equivalencia de las unidades de medida antes mencionadas y con el sistema inglés son las siguientes:

Tabla 1.3. Equivalencia de unidades de medida, básicas y derivadas.

UNIDAD	Equivalencia en el SI	Equivalencia en el Sistema Inglés
1 m	= 1000 mm = 100.0 cm = 0.001 km	= (1/0.9144) yd = (1/0.3048) ft = (1/0.0254) in
1 kg	= 1 000 g = 0.001 Ton	= (1/0.4536) lb
1 s	= (1/60) min = (1/3 600) hora = (1/86 400) día	= (1/60) min = (1/3 600) hora = (1/86 400) día
1 m ²	= 1 000 000 (mm) ² = 10 000 cm ² = 0.000 001 km ² = 0.000 01 hectárea	= (1/0.8361) yd ² = (1/0.0929) ft ² = (1/0.0006452) in ² = (1/4 047) acre
1 m ³ 1 litro	= 1000 litros = 1 000 dm ³ = 1 000 000 cm ³ = 1 000 ml = 1 000 cm ³ = 1 dm ³	= (1/0.7646) yd ³ = (1/0.028 32) ft ³ = (1/0.00001639) in ³ = (1/3.785) US gal = (1/4.546) UK gal
1 m/s	= 3.6 km/h	= (1/0.3048) ft/s = (1/ 0.44694) milla/h
1 Ton/m ³	= 1 kg/l	= (1/0.016 02) lb/ft ³
1 kg/cm ²	= 10 Ton/m ² = 10 bar = 10 m H ₂ O ^(*) = 735.7 mm Hg	= (1/0.0703) lb/in ² (psi) = 32.81 ft H ₂ O = 28.965 in Hg
1 l/s	= 60 l/min = 3.6 m ³ /h = 86.4 m ³ /día	= (1/28.3168) ft ³ /s = (1/3.785) gal/s = (1/15.852) gal/min

(*) Esto indica que son metros en columna de agua

Existen constantes físicas cuyos valores también es necesario conocer, así como sus equivalencias en el sistema inglés, a continuación se presentan las más empleadas en hidráulica.

Tabla 1.4.- Valores estándar de características físicas

Constante	Valor en el SI	Equivalencia en el Sistema Inglés
Densidad del agua ρ , a 4°C:	101.97 kg-s ² /m ⁴	1.939 45 lb-s ² /ft ⁴
Aceleración de la gravedad g	9.806 65 m/s ²	32.174 ft/s ²
Peso específico ($\gamma = \rho g$), del agua a 4°C:	1 000 kg/m ³	62.4 lb/ft ³
Peso específico del mercurio Hg	13.592 Ton/m ³	848.521 lb/ft ³

Ejercicios:

Marque con una X en el (los) cuadro(s) de la(s) respuesta(s) que es (son) correcta(s)

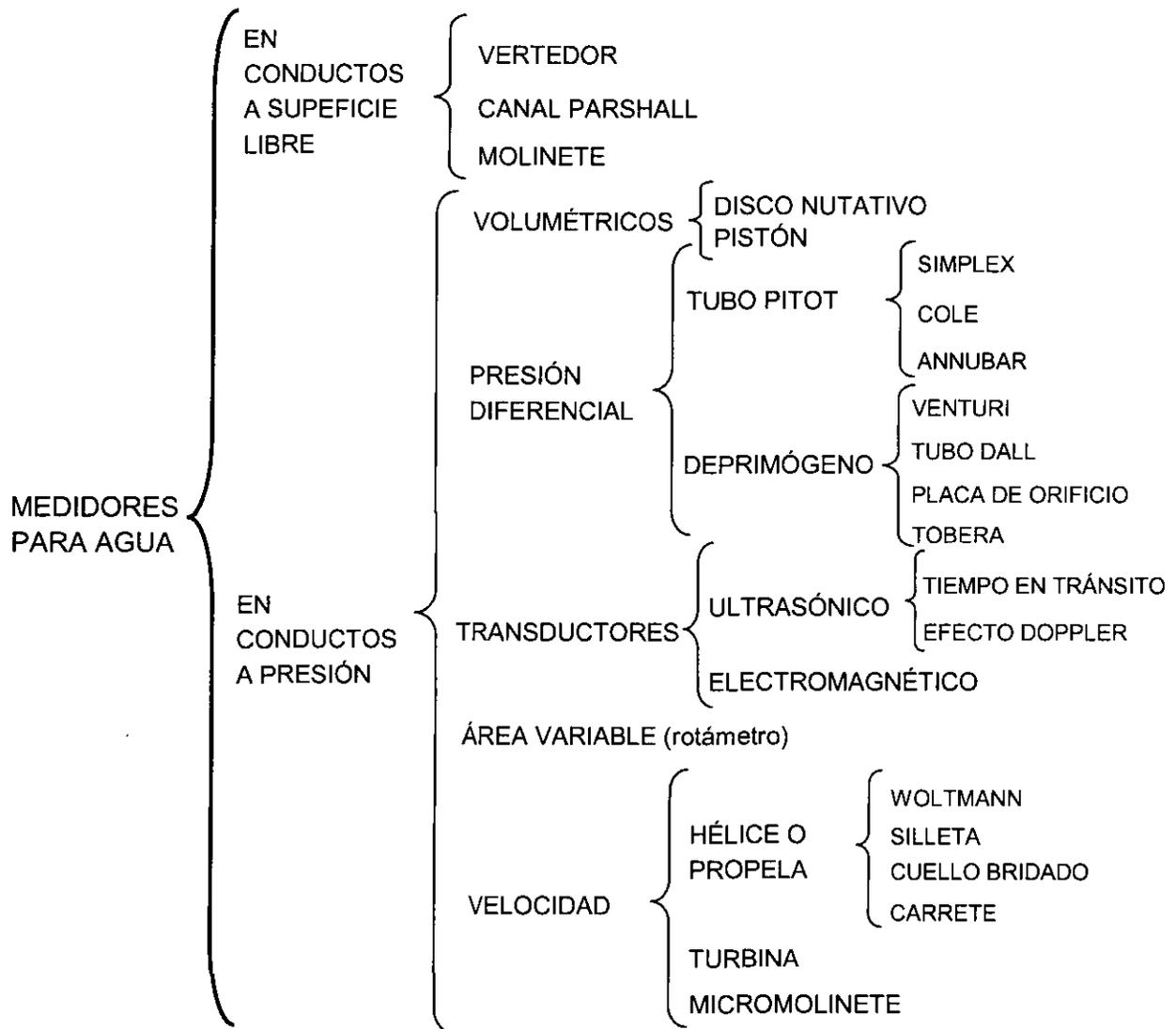
1. La macromedición se emplea para medir:
 - a) El consumo a nivel doméstico
 - b) El caudal en tomas domiciliarias
 - c) La altura de los tanques
 - d) Grandes caudales en un sistema
2. Para qué sirve la macromedición:
 - a) Mejorar la operación del sistema
 - b) Evaluar el funcionamiento del sistema
 - c) Obtener datos para la toma de decisiones
 - d) Dotar de más servicios a los usuarios
3. Para qué sirve una Unidad Operacional:
 - a) Controlar los consumos
 - b) Cobrar el servicio de agua potable
 - c) Captar o conducir o bombear o almacenar, o distribuir agua potable
 - d) Depurar el agua residual
4. 500 litros de agua pesan:
 - a) 50.0 kg
 - b) 0.5 kg
 - c) 500.0 kg
 - d) 5 000.0 kg
5. La presión se mide comúnmente en:
 - a) m/s
 - b) m^3/s
 - c) kg/cm^2
 - d) m/s^2
6. La presión que se debe leer en un manómetro instalado en la base de un tanque que tiene una elevación de 3.0 m de agua en su interior es de:
 - a) $3.0 kg/cm^2$
 - b) $0.3 kg/cm^2$
 - c) $0.03 kg/m^2$
 - d) $30.0 kg/cm^2$
7. Una presión de un kilogramo por centímetro cuadrado ($1 kg/cm^2$), debe elevar el agua a una altura de:
 - a) 100.0 m

- b) 1.0 m
 - c) 10.0 m
8. La presión estática es definida como:
- a) La energía del movimiento del agua
 - b) La presión debida al tirante o elevación del agua
 - c) La pérdida de presión por la fricción
 - d) Todas las anteriores
9. Un caudal de 8 litros por segundo equivale a:
- a) 64 l/min
 - b) 48 l/min
 - c) 480 l/min
 - d) 0.008 m³/s
10. En un flujo, donde el gasto permanece constante, ¿qué pasa con la velocidad si el diámetro disminuye gradualmente?
- a) Se mantiene constante
 - b) Disminuye gradualmente
 - c) Aumenta gradualmente
 - d) Se reduce a cero
11. ¿Qué pasa con la velocidad y la presión, en un flujo donde el diámetro permanece constante y el gasto disminuye gradualmente?
- a) La velocidad disminuye y la presión aumenta
 - b) La velocidad permanece constante y la presión aumenta
 - c) La velocidad aumenta constante y la presión disminuye

3.- EQUIPOS DE MEDICIÓN

3.1 Clasificación de equipos de medición

A continuación se presenta una clasificación general de los macromedidores para agua.



3.2 Medidores en conductos a superficie libre

Cuando se desea medir el agua cruda o residual que fluye en canales a superficie libre, los dispositivos de medición más apropiados son: el vertedor, el canal Parshall y el molinete.

Vertedores

Se le llama vertedor al muro o placa sobre la cual fluye agua a superficie libre. Si la descarga se efectúa sobre una placa con borde afilado, se le llama vertedor de pared delgada; pero, cuando el flujo es sobre una superficie amplia –como la de un muro ancho–, el vertedor es de pared gruesa.

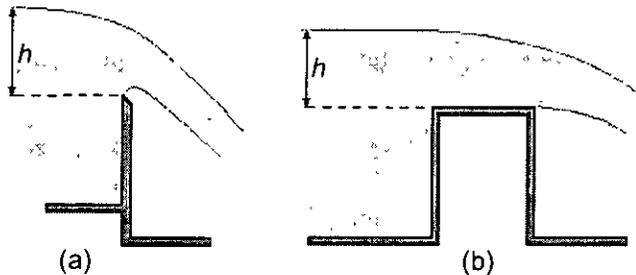


Figura 3.1. Vertedores (a) de pared delgada y (b) de pared gruesa

El vertedor más común para medir agua de manantiales o de tomas superficiales es el rectangular de pared delgada con contracciones laterales estándar. Este se emplea para caudales entre 28 y 280 l/s; la carga, h , sobre la cresta debe ser mayor a 6.0 cm y la longitud de la cresta, L , debe ser mayor a seis veces la carga, h , que se esté midiendo. El error máximo está entre $\pm 1.0\%$ y $\pm 2.0\%$. Tiene un rango de medición limitado.

Canal Parshall

Se le llama canal Parshall o aforador Parshall al canal formado por cuatro tramos: el primero, tiene fondo ascendente 1:4, con paredes verticales convergentes entre sí, forma el canal de entrada; el segundo, tiene fondo plano con paredes verticales convergentes entre sí y forma un canal de transición; el tercero, de longitud corta, tiene fondo descendente con paredes verticales paralelas, forma la garganta; y el cuarto, tiene un fondo ascendente y paredes verticales divergentes, forma el canal de salida.

Este aforador produce un tirante de mínima energía al inicio de la garganta; este es su principio de funcionamiento. Para determinar el caudal, solo se mide el tirante aguas arriba, en el canal de transición a una distancia bien establecida, si la descarga no está ahogada.

Este dispositivo permite medir caudales desde 0.09 l/s hasta 93.00 m³/s; las dimensiones varían de acuerdo con el intervalo de caudales que puede medir dentro con un límite de error de $\pm 3.0\%$; Para ello, solo se mide el tirante h_1 , aguas arriba, en descarga libre. En caso contrario, se miden los tirantes: h_1 , aguas arriba y h_2 , aguas abajo.

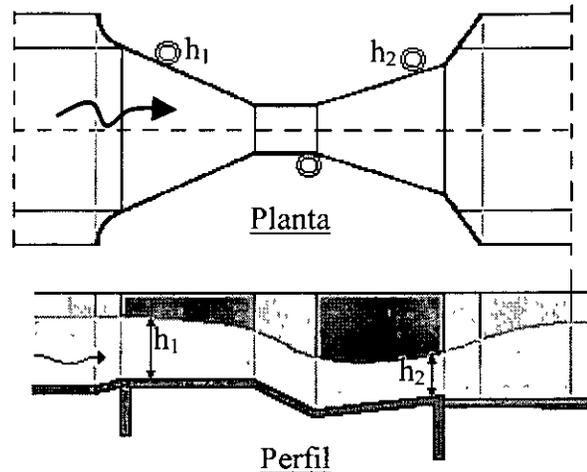


Figura 3.2- Canal Parshall

Molinete

El molinete es un aparato provisto de una hélice o una rueda de copas, que accionada por la corriente, gira alrededor de un eje montado en un dispositivo de suspensión, y transmite su movimiento a un sistema registrador que permite contar el número de vueltas que da la hélice en un tiempo determinado.

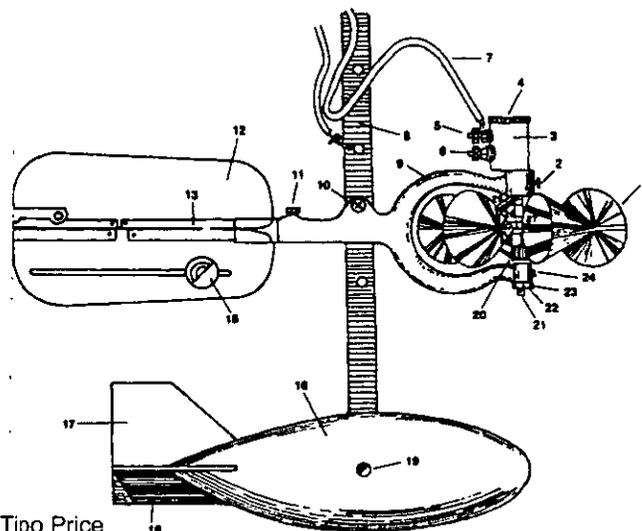


Figura 3.3 Molinete de copas o Tipo Price

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Rueda de copas | 19. Tornillo suspensión torpedo |
| 2. Tornillo de ajuste | 20. Tuerca rueda de copas |
| 3. Cámara de contactos | 21. Pivote |
| 4. Tope de la cámara | 22. Tuerca de ajuste pivote |
| 5. Borne para contacto simple | 23. Tornillo opresor |
| 6. Borne para contacto penta | 24. Tornillo de ajuste |
| 7. Alambre de corriente | 25. Eje |
| 8. Solera de soporte | 26. Soporte rueda de copas |
| 9. Horquilla | 27. Tuerca del soporte |
| 10. Tornillo de suspensión | 28. Tope contacto simple |
| 11. Tornillo de conexión | 29. Soporte eje rueda de copas |
| 12. Timón vertical | 30. Sinfín contacto penta |
| 13. Timón horizontal | 31. Engrane contacto penta |
| 14. Broche de cierre | 32. Espiral contacto penta |
| 15. Contrapeso | 33. Topes contacto penta |
| 16. Escandallo (torpedo) | 34. Espiral contacto simple |
| 17. Timón vertical del torpedo | 35. Rosca aislante del contacto |
| 18. Timón horizontal del torpedo | |

La combinación del número de vueltas y el tiempo en que las realiza, determina la velocidad del flujo. El caudal se calcula con el dato de la velocidad, obtenida con el molinete y el área transversal de la corriente en la sección donde se mide. No se recomienda su uso si las velocidades son mayores a 2.5 m/s.

3.3 Medidores en conductos a presión

De acuerdo con el tipo de registro que proporcionan, los macromedidores en conductos a presión se pueden clasificar en:

- a) Medidores totalizadores (registran el volumen)
- b) Medidores de flujo (registran el caudal instantáneo)

Se dice que un medidor es totalizador cuando el registro del volumen se obtiene en periodos grandes; las unidades de medida más comunes son: *litros/hora, m³/hora, m³/día, etc.*

Un medidor de flujo puede registrar con precisión la velocidad instantánea del agua que circula por una tubería; y de acuerdo con el principio de continuidad, si se conoce el diámetro de la tubería, se puede conocer el caudal. Las unidades de medida más comunes son: *litros/segundo, litros/minuto, m³/segundo, etc.*

También se pueden clasificar de acuerdo con su principio de funcionamiento en:

- (1) Volumétricos o de desplazamiento, miden por volumen.
- (2) De velocidad y de presión diferencial, dependen de la fuerza dinámica del fluido para su funcionamiento.
- (3) Transductores, captan y convierten las señales sonoras, magnéticas o calóricas, en señales eléctricas para medir la velocidad del flujo.

3.3.1 Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos actuales son del tipo *pistón oscilante* y *disco nutativo*. El de pistón oscilante consiste en un disco grueso colocado dentro de una cámara, la cámara tiene una entrada por donde ingresa un volumen de agua mientras el pistón sella la salida; cuando el agua ha llenado el espacio vacío, el pistón se desplaza por efecto de la presión del agua, sella la entrada y abre la salida para dejar pasar un volumen exacto de agua en cada ciclo del pistón.

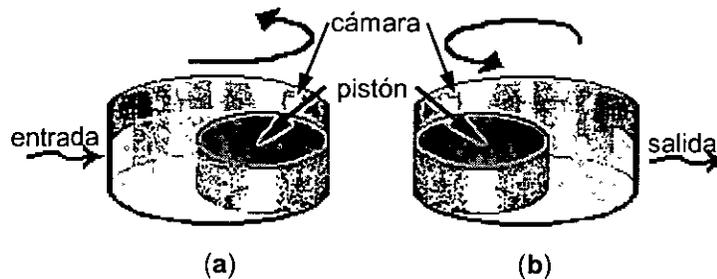


Figura 3.4 Pistón nutativo (a) ingreso del agua a la cámara y (b) salida del volumen de agua

El de disco nutativo funciona de la misma manera, solo que en lugar del pistón utiliza un disco delgado montado en un eje inclinado, al girar hace las mismas funciones que el pistón antes descrito.

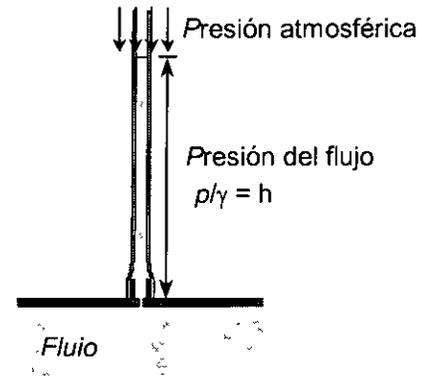
Estos medidores tienen errores bajos entre $\pm 3\%$ y $\pm 5\%$, se pueden instalar en cualquier posición y no se requiere ubicarlos en una sección recta de tubería. Sin embargo, estos medidores solo se fabrican en diámetros de hasta 2 pulgadas (50 mm), para 380 l/min, por lo cual su empleo para sistemas de macromedición es limitado.

3.3.2 Medidores de presión diferencial

En el capítulo 1.3 se observó que la energía hidráulica del agua en movimiento E , en un punto, tiene dos componentes principales: p/γ y $v^2/2g$; la carga de presión y la carga de velocidad, respectivamente. En un punto de un flujo se puede medir la suma de ambas componentes con el tubo de Pitot y con un piezómetro solo la carga de presión; a la diferencia entre las dos cargas, también se le llama presión diferencial.

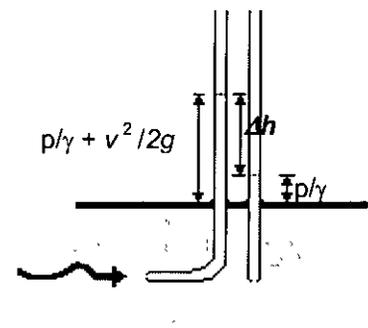
¿Qué es un piezómetro?

Es un dispositivo que sirve para medir presiones estáticas pequeñas –también se usa para medir el nivel del agua en tanques de almacenamiento–; está formado por un tubo transparente de diámetro pequeño, conectado al interior de la tubería –o del depósito– por medio de un niple y con el otro extremo abierto a la atmósfera.



Tubo de Pitot

El tubo de Pitot está formado por un tubo que está doblado en forma de "J" y se utiliza junto con un piezómetro para obtener la carga de velocidad. El tubo en "J" tiene su rama inferior dirigida en contra de la dirección del flujo, por lo cual recibe toda la energía del agua en ese punto ($p/\gamma + v^2/2g$), a esto se le llama carga total. El piezómetro, por estar colocado en forma perpendicular al flujo, no puede recibir el impacto debido a la velocidad, por lo que solo captará la carga de presión en ese punto (p/γ).



De esta forma, puede verse que la diferencia entre las dos cargas Δh , es igual a la carga de velocidad $v^2/2g$, de donde se puede despejar la velocidad que se expresa como $v = \sqrt{2g\Delta h}$. Si se conoce la velocidad, y el área A , de la sección es conocida; entonces, por el principio de continuidad se puede calcular el caudal que pasa por esa sección $Q = v A$.

Tubo de Pitot Simplex

Este instrumento emplea el principio del tubo de Pitot, tiene los dos tubos colocados en el interior de otro en cuyo extremo inferior se encuentran las entradas de los mismos. En el exterior de un cabezal solo se puede ver un orificio alargado al cual se le llama *de impacto* y a los lados, en forma perpendicular, se encuentran dos orificios que conectan el tubo que recibe la carga de presión, a estos últimos se les llama *de referencia*.

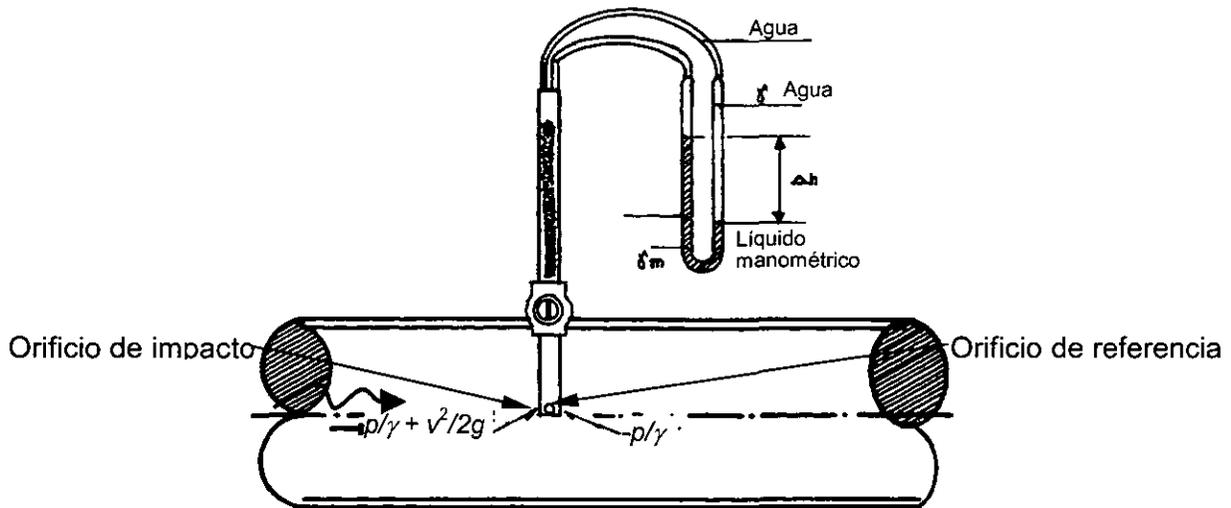


Figura 3.5 Tubo de Pitot Simplex en una tubería y conectado a un manómetro diferencial.

- ❑ Este equipo se emplea en estaciones de medición no permanentes.
- ❑ La instalación de este instrumento debe hacerse en secciones rectas de tubería y donde las válvulas, codos u otros accesorios estén alejados una distancia mayor a 30 diámetros, medida desde el punto donde se instalará el tubo.
- ❑ El error máximo de este aparato está entre $\pm 1.0\%$ y $\pm 4.0\%$. Requiere personal capacitado.
- ❑ No se recomienda su uso si la velocidad en el conducto es menor que 0.4 m/s , o si la presión es mayor a 15.0 kg/cm^2 o si el agua tiene sólidos en suspensión.

Para el cálculo de la velocidad se debe seguir un procedimiento establecido, donde se emplean varios coeficientes que corrigen la diferencia por reducción del área, las pérdidas por fricción en la entrada del "Pitot", la variación de la velocidad en el interior del tubo y otros.

Tubo de Pitot tipo Cole

El principio de funcionamiento es el mismo, pero con este tipo se puede medir la velocidad aún si cambia el sentido del flujo.

En la figura 2.6 se muestra el cabezal del tubo con los orificios en las posiciones (a) abierto y (b) cerrado.

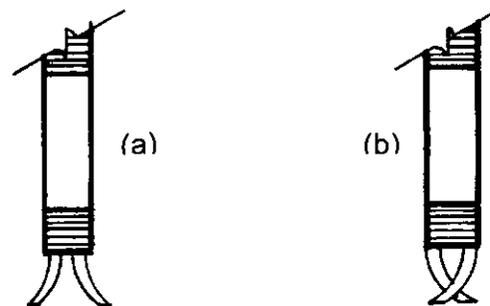


Figura 3.6 Cabeza del Tubo de Pitot tipo Cole

Tubo de Pitot modificado "Annubar"

El principio de funcionamiento es el mismo, pero este, a diferencia del tubo de Pitot Annubar, tiene 4 o 6 orificios de impacto distribuidos a lo largo del tubo en función de su longitud, en vez de uno solo.

En algunos modelos de Annubar se puede medir la velocidad aún si cambia el sentido del flujo. El error máximo a escala completa es de $\pm 1.0\%$ y su rango de medición es limitado.

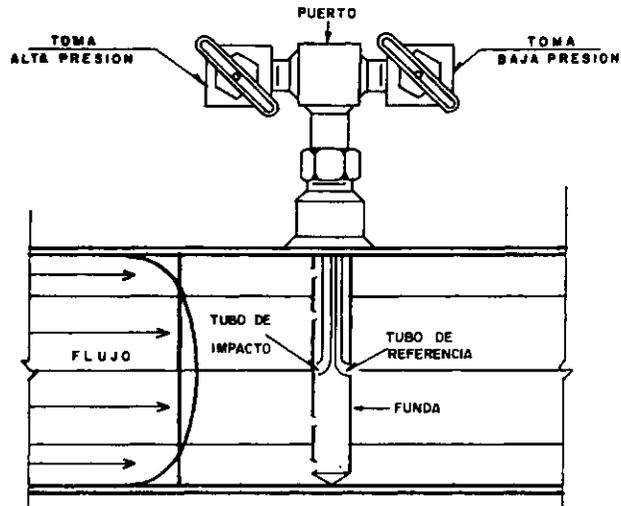


Figura 7 Tubo Pitot Modificado "Annubar"

3.3.3 Medidores deprimógenos

Los medidores deprimógenos son dispositivos relativamente simples. Su funcionamiento consiste básicamente en reducir el área de la sección del flujo para provocar un incremento en la velocidad y reducir la presión en el mismo –véanse los capítulos 1.2 y 1.3. La presión diferencial se puede medir con un manómetro conectado entre una sección antes del cambio en el régimen del flujo y la sección donde se presenta el cambio; con dicha presión diferencial se calcula el caudal.

Tubo Venturi

Es un dispositivo formado por una tubería de sección transversal variable, consta de tres partes: una sección cuyo diámetro es constante e igual al de la tubería donde está instalado junto con una sección convergente que forma la entrada; al final de esta, continúa una sección recta que forma la garganta; y por último, una sección divergente de salida.

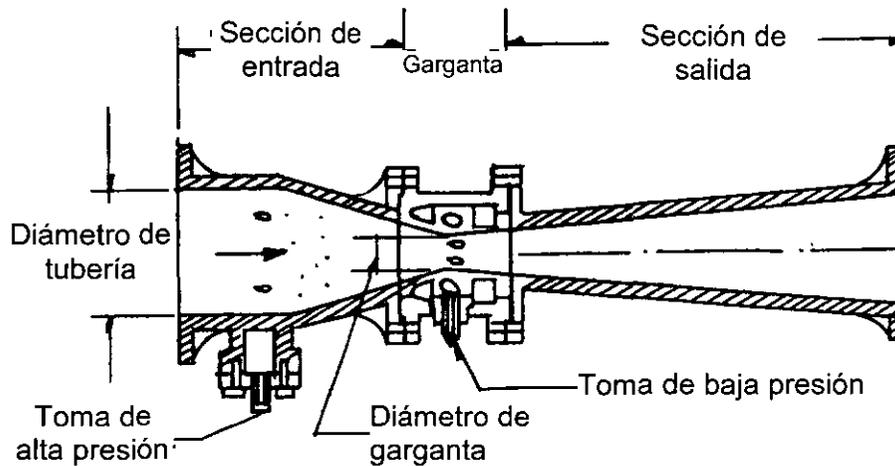


Figura 3.8 Partes que componen al Tubo Venturi o Venturímetro.

Dentro del tubo Venturi, en la sección convergente se produce un estrangulamiento del flujo; con el caudal constante, la velocidad aumenta y la presión disminuye en forma proporcional a la variación en el área de la sección. Si se mide la presión diferencial entre la sección constante en la entrada al "Venturi" y la sección en la garganta, entonces se puede calcular el caudal.

- Este equipo se emplea en estaciones de medición permanentes.
- La instalación de este instrumento debe hacerse en secciones rectas de tubería y cualquier accesorio estará alejado una distancia mayor a 20 diámetros.
- El error máximo es de $\pm 0.75\%$. Tiene un rango de medición limitado
- Puede medir velocidades bajas con precisión (Δp 's pequeños).
- Se recomienda su uso para agua que no tenga sólidos en suspensión, en caso contrario, se deben prever accesorios de limpieza y dar mantenimiento con mayor frecuencia.
- Tiene baja pérdida de carga, no tiene partes móviles y es resistente.
- Es caro comparado con otros tipos de medidores, por lo cual solo se justifica si se requiere una precisión alta, como en: control de procesos –potabilización o depuración–, calibración de instrumentos y medidores.

Tubo Dall

Este medidor es básicamente un Tubo Vénturi pero modificado. Se compone de una entrada recta, una reducción abrupta de sección variable convergente, una garganta corta y una sección de salida de área variable divergente.

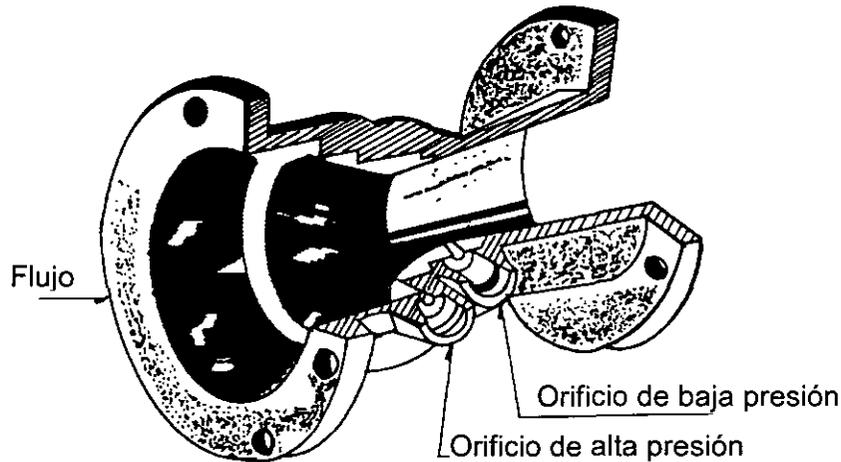


Figura 3.9 Partes que componen al Tubo Dall.

- ❑ Este equipo se emplea en estaciones de medición permanentes.
- ❑ La instalación se hace en secciones rectas de tubería y cualquier accesorio debe estar alejado una distancia mayor a 40 diámetros.
- ❑ EL error máximo es de $\pm 1.0\%$. Tiene un rango de medición limitado.
- ❑ Se recomienda su uso para agua que no tenga sólidos en suspensión.
- ❑ Tiene baja pérdida de carga, no tiene partes móviles y es resistente.
- ❑ Es caro comparado con otros tipos de medidores.

Placa de orificio

Este es un dispositivo formado por una placa metálica con un orificio de área conocida A_o , que es menor que el diámetro de la tubería de conducción; esta placa se inserta en la tubería, con la cara que tiene el orificio, en forma perpendicular al eje del flujo. La reducción en el área $A \downarrow$, produce un aumento en la velocidad $v \uparrow$, del flujo y una disminución en la presión $p \downarrow$, del mismo; esta variación determina el caudal.

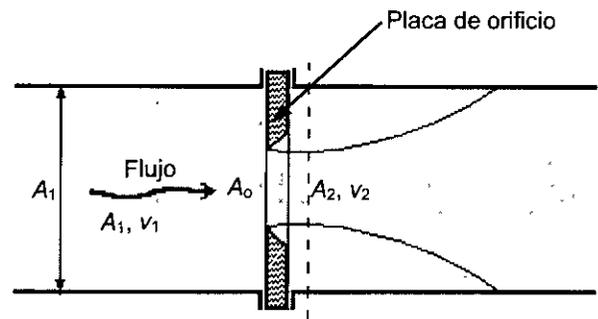


Figura 3.10 Medidor Placa de orificio

- ❑ Este dispositivo se puede emplear como estación de medición permanente o no permanente, por su facilidad de montaje o desmontaje.
- ❑ Este instrumento debe instalarse en secciones rectas de tubería y cualquier accesorio debe estar alejado una distancia mayor a lo indicado en la gráfica 2.1.
- ❑ El error máximo es de $\pm 1.0\%$, pero su rango de medición es limitado. Debe verificarse en forma frecuente.
- ❑ Su diseño es simple, de fácil calibración y tiene un costo bajo.
- ❑ Se usa con agua que no tenga sólidos en suspensión.
- ❑ Tiene alta pérdida de carga, no tiene partes móviles y es resistente.
- ❑ Se deteriora en un tiempo relativamente corto si no está protegido contra la corrosión.

Tobera

En el caso de tuberías con diámetros mayores a 300 mm (12 pulg.), se emplean toberas en lugar de placas de orificio. Una de las más comunes se muestra en la figura 2.10, funciona como la placa de orificio, pero esta tiene una forma que se adapta a la vena contracta del flujo y así elimina el coeficiente de contracción. Este dispositivo se fabrica sobre especificaciones de diámetro y caudales que se requiere medir.

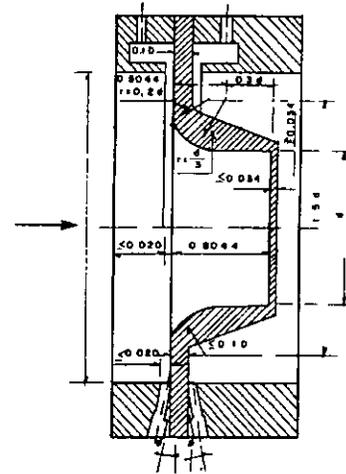


Figura 3.11 Medidor Tobera



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**



**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**



**COMISIÓN NACIONAL
DEL AGUA**



Menú

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

MANEJO DE EQUIPO DE HIDROMETRÍA

1994

GERENCIA DE INGENIERÍA BÁSICA Y NORMAS TÉCNICAS

INTRODUCCIÓN.

Este documento, fundamentalmente va dirigido al personal de los organismos operadores de sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, y específicamente a las áreas de operación por ser estas las responsables de llevar el control hidráulico, desde las fuentes de captación, regularización y distribución

El control hidráulico, se realiza mediante el uso de equipos permanentes de medición de caudal, de volúmenes, de presión y niveles, más el equipo portátil de campo de pitometría con el cual es posible determinar el perfil de velocidades a lo largo de la sección de la tubería generado por un fluido en movimiento, con un buen grado de aproximación a la realidad, y en consecuencia se pueda calcular el flujo por unidad de tiempo que está circulando.

La aplicación de este método en la medición de caudales en tuberías a presión es de gran utilidad en los sistemas de agua potable y saneamiento; debido a su versatilidad y exactitud, en la determinación de volúmenes explotados, conducidos y entregados. Se mencionan algunas de las aplicaciones específicas como son, la calibración de equipos de macromedición, la medición de caudales en diferentes puntos y con diferentes diámetros y materiales de tuberías, la medición de gastos para determinar eficiencias electromecánicas en equipos de bombeo, y la realización de balances hidráulicos de la red, etc.

Este documento incluye información sobre los componentes que integran el equipo, la herramienta indispensable para su manejo, los materiales que será necesario adquirir y por último, el procedimiento para realizar las mediciones, para determinar el caudal que conducen las tuberías a presión.

OBJETIVO

Este documento está enfocado a la capacitación y orientación de; personal de operación de los sistemas de agua potable y saneamiento en el campo de la hidrometría, tratando especialmente el método de aforo por medio del tubo Pitot, considerado como uno de los más exactos, tratándose de medir caudales en conductos a presión.

Debido a la utilidad que representa para los organismos operadores, el contar con personal capacitado en esta especialidad, éste documento describe el equipo necesario, su utilización y explica el método a seguir en la realización de aforos.

1.- Descripción del equipo de hidrometría tipo Pitot y sus accesorios.

1.1 Equipo, herramienta y materiales.

Este documento inicia con una descripción general del equipo, herramienta y materiales que integran un equipo de pitometría para posteriormente explicar a detalle cada una de las partes que lo componen.

Para ilustrar parte del equipo, en la figura No. 1 se muestra el manómetro diferencial, dos tubos Pitot, así como varillas calibradoras. En la figura No. 2 se muestra la máquina insercionadora, pudiéndose apreciar las silletas para diferentes diámetros de tubería, así como la cadena y algunas otras piezas especiales para su colocación y operación.

FIGURA No. 1

FIGURA No. 2

Relación del equipo herramienta y materiales.

Válvula de inserción

- Válvulas de inserción tipo Mueller o similar de 1 " de diámetro para uso en pitometría.

Máquina insercionadora para trabajar a presión, integrada con:

- Cuerpo principal.
- Vástago porta herramienta.
- Palanca operadora o matraca.
- Silletas de diferentes diámetros en duro-aluminio o hierro fundido.
- Empaque para silletas.
- Empaque para cuerpo.
- Cadena y ganchos de sujeción.
- Llave de cuadro.
- Llave prensa estopa.
- Grasa para lubricar barreno.
- Caja metálica de acero esmaltada
- Herramienta porta inserción para 1 para máquina
- Mueller o similar.

Brocas machuelo

Broca machuelo de 1 " de diámetro para acero
Broca machuelo de 1 " de diámetro para asbesto cemento.
Para uso en otros materiales, ver punto 1.3

Varilla calibradora

Varilla para calibración de diámetros internos en tuberías, tipo simplex, para ser utilizada en válvula de inserción tipo Mueller de 1 en tuberías de hasta 54" de diámetro.

Tubo Pitot

- Tubo Pitot plano tipo Simplex 3 pies
- Tubo Pitot plano tipo Simplex 5 pies
- Tubo Pitot plano tipo Simplex 7 pies

Manómetro diferencial

- Tubo de vidrio "U" de 7mm. de diámetro 32" de largo, para una presión de hasta 20 Kg/cm². (repuesto)
- Manómetro diferencial con mangueras, manifold igualador de presiones, montado en gabinete metálico.

Líquidos manométricos

- Líquidos manométricos
Tetracloruro de carbono
Bencina químicamente pura (benzeno)
Bromoformo
Mercurio tridestilado

Registrador de velocidad

- Registrador de velocidad de rango 0-11 pies/seg con: Mangueras Mercurio tridestilado 6 Kg.
Paquete de gráficas.
Frasco de tinta y plumilla, 6 pluma de cartucho desechable.
Llave para cuerda.
Llave de purga. Gabinete de protección

Registrador de presión diferencial

- Registradores de presión diferencial con célula Dri-Flo. de: 0-10, 0-20, 0-50" columna de agua, rangos mayores según necesidades de las mediciones, gráfico lineal con reloj de cuerda mecánica de 8 días con rotación para 24 hrs, y cambio a 7 días, que incluya:
Base para instalación y Manifold con 5 válvulas

Material de laboratorio

- Embudo pequeño para líquidos manométricos
- Colorante vegetal para líquidos manométricos
- Densímetro de 1 a 2 grs.
- Tubo Nessler de 30 m.l.
- Probeta de 100 m.l.

Herramienta y artículos varios

Cinta métrica de 2 m.
Gráficas para registrador de velocidad
Gráficas para registrador de presión diferencial
Steeleson No. 14
Steeleson No. 18
Llaves españolas 6 diferentes medidas
Martillo de bola 4 lbs
Pinza de presión No. 8
Pinza de mecánico No. 8
Desarmadores 6 diferentes medidas

1.2.- Válvula de inserción.

La válvula de inserción es el accesorio que permite en condiciones de operación, el acceso al interior de la tubería, del gancho calibrador y del tubo Pitot, para realizar las mediciones hidráulicas.

DESCRIPCIÓN.

Este accesorio consiste en una válvula esférica, cuyo diámetro interno es de 1 ". En su parte superior, cuenta con cuerdas tipo NPT (rectas) cuyo diámetro interno corresponde a 1 " y el externo a 1-112".

En su parte inferior únicamente cuenta con una cuerda exterior tipo A.W.W.A. (Cónica), Ver figura No. 3.

Válvula de inserción. Figura No. 3

Instalación y operación.

Esta válvula se instala generalmente en el lomo del tubo, a través de una perforación que se realiza con la máquina insercionadora Mueller y se opera únicamente cerrada o abierta con giro de un cuarto de vuelta, estando construida generalmente de bronce.

Si la tubería es de acero con un espesor de $1/1 T$ o menor, al punto donde se instalará la válvula de inserción se le debe soldar previamente, un refuerzo, el cual consiste en una lámina de acero con la curvatura del tubo de las siguientes dimensiones: 300 mm. de largo x 300 mm. de ancho y 4.8 mm. de espesor (12" x 12" x 3/16"). Esta lámina tiene

por finalidad garantizar que la sujeción de la válvula de inserción se haga con un mayor número de hilos de rosca.

Si la tubería es de asbesto cemento, es posible instalar directamente sobre ella la válvula de inserción, sin embargo alguna literatura aconseja por seguridad usar abrazaderas. Para el caso de tuberías suaves, como son el P.V.C. y Polietileno de alta densidad la instalación de la válvula se debe efectuar sobre abrazaderas como la que se ilustra en la figura No. 4.

Figura No. 4

1.3.- Máquina insercionadora.

Esta máquina se usa para perforar, roscar e instalar la válvula de inserción en tuberías a presión, de acero o asbesto cemento. Para el caso de tuberías fabricadas de concreto o materiales suaves como son el polietileno y el P.V.C., no se usa esta máquina, la perforación e instalación de la válvula se debe realizar con la tubería sin presión y en forma manual.

La perforación y machueleado deben efectuarse con machuelos que ejecuten cuerdas tipo A.W.W.A.(Mueller) de los que existen 2 tipos: de cabeza redonda o cuadrada (figura No. 5), estas son para perforar en tuberías de acero o asbesto cemento.

Machuelos para cuerda tipo A.W.W.A. (Mueller). figura No. 5

Para perforar las tuberías trabajando a presión, se usa la máquina insercionadora la cual consta de dos secciones, una con elementos móviles y la otra fija, que cuenta con un compartimento estanco en contacto con la tubería, esto permite realizar la perforación, machueleado e instalación de la válvula de inserción, aún cuando la tubería se encuentre trabajando a presión. Figura No. 6.

Para sentar la máquina sobre el tubo se usa una pieza denominada silleta, que permite adaptar la base de la insercionadora con la curvatura del tubo.

Máquina insercionadora (Mueller) para tuberías a presión. Figura No. 6

Descripción de la máquina insercionadora Mueller para tuberías a presión.

Como ya se mencionó, ésta máquina se divide en dos secciones, la fija y la móvil.

La sección fija esta constituida por:

- Cadena para fijar la máquina a la tubería y ganchos de sujeción
- Silleta para adaptar la base de la máquina al diámetro de la tubería
- Cuerpo de la máquina, que contiene la cámara estanca.

- By-Pass y sus accesorios.
- Válvula de compuerta.

La sección móvil esta constituida por:

- Cruceta de acople de la sección fija con la sección móvil.
- Barra de perforación.
- Cruceta para dar presión a la barra de perforación.
- Matraca para girar la barra de perforación.

1.3.1.Instalación y operación de la máquina insercionadora. Barrenación y roscado de la tubería.

Para efectuar la barrenación y roscado de la tubería se sigue el siguiente procedimiento.

- Se selecciona la silleta adecuada para el montaje de la máquina insercionadora en función del diámetro de la tubería y se coloca en el lomo del tubo, acompañada de sus empaques respectivos.
- Se monta la sección fija sobre la silleta y se sujeta al tubo mediante la cadena de sujeción, procediéndose a abrir la válvula del by-pass que se ubica sobre el cuerpo de la máquina.
- Se selecciona la broca machuelo en función del material de construcción de la tubería. Las brocas vienen marcada STEEL para tuberías de acero y CEM-RES para asbesto cemento.
- Se coloca la broca-machuelo seleccionada, en la barra de perforación engrasándose las partes móviles de la máquina y la broca-machuelo.
- Se procede a acopiar la sección móvil a la sección fija, mediante la cruceta de acople.
- Se baja la barra de perforación hasta tocar el tubo.
- Se ajusta la cruceta para dar presión a la barra de perforación, hasta que se sienta que ésta ejerce presión sobre el tubo.
- A partir del punto anterior hay que ir accionando la matraca y la cruceta simultáneamente para dar presión, en el sentido de las manecillas del reloj para que la broca-machuelo inicie la perforación del tubo, cuando se presente una pequeña fuga de agua en la válvula by-pass, será la señal de que la perforación sobre la tubería ha sido terminada.

- A partir de la posición anterior, se marca en la barra perforadora la distancia que desarrollará la cuerda para no pasarse, esto es especialmente importante para el caso de tuberías de materiales relativamente suaves como lo es el asbesto-cemento.
- Se continuará accionando la matraca y la cruceta, hasta que la barra perforadora recorra la distancia marcada.
- Una vez logrado lo anterior, se procede a regresar la barra perforadora hasta topar con la cruceta de acople, operando la matraca y la cruceta simultáneamente, en sentido inverso al de la perforación, ésta operación tiene que realizarse con mucho cuidado, para evitar que la presión empuje la barra perforadora hacia arriba y dañe las cuerdas maquinadas en el tubo, o se mueva la máquina, ocasionando una desalineación con respecto al eje de la perforación, y no se pueda instalar la válvula de inserción.

Instalación de la válvula de inserción.

Una vez que se regresó la barra perforadora hasta topar con la cruceta de acople, se procede de la siguiente forma:

- Se cierra la compuerta de seccionamiento localizada en la sección fija.
- Se cierra la válvula BY-PASS para que la presión quede confinada en la zona inferior del cuerpo de la insercionadora.
- Se retira la matraca de la barra perforadora.
- Se desacopla la sección móvil de la sección fija, de acuerdo al siguiente procedimiento: con una mano se acciona la cruceta de acople y con la otra se sostiene la barra perforadora, esto con el fin de no presionar la válvula de compuerta.
- Se revisa la válvula de inserción para verificar que la abertura libre de la misma sea de 1 " y eliminar bordes, rugosidades o cualquier falla que pueda impedir el paso del tubo Pitot o la varilla calibradora.
- Se retira la broca machuelo y en su lugar se coloca el porta inserciones acoplado con la válvula de inserción, verificando que ésta última esté cerrada.
- Se vuelve a acoplar la sección móvil a la fija, mediante la cruceta de acople.
- Se coloca la matraca y se abre la válvula BY-PASS, se abre la compuerta de seccionamiento y se procede a bajar la barra perforadora con la válvula de inserción, con el mismo procedimiento y cuidado descrito en el punto de perforación y roscado del tubo, iniciando la operación de la matraca, se deja de dar vuelta a la barra cuando se escuche un chirrido producido por el apriete de la válvula de inserción en la tubería.

- Para desmontar la válvula del porta-insercionador, se procede de la siguiente forma: Se le da un pequeño golpe a la matraca en sentido contrario a las manecillas del reloj, con la finalidad de liberar el porta-inserción de la válvula de inserción.
- Se procede a desmontar la máquina insercionadora en el sentido inverso al del montaje.

Con esto último queda la válvula de inserción, instalada, cerrada y en condiciones de ser utilizada.

En el caso que el proyecto de medición contemple instalar la estación al estar construyendo o tendiendo las tuberías. Esto se lleva a cabo con una variante de la máquina insercionadora, que operará en tuberías sin presión. (Figura No. 7) está constituida por una silleta de fierro fundido que se fija al tubo con una cadena de amarre, en su parte superior tiene una barra rectangular sobre la que corre el brazo con un tornillo guía.

Una vez efectuada la perforación y machueleado, se retira la máquina y se atornilla la válvula de inserción directamente con herramientas manuales.

Máquina insercionadora (Mueller) para tuberías vacías. figura No. 7

1.4.- Varilla calibradora.

La varilla calibradora es utilizada para determinar el diámetro interno real de la tubería, donde se pretende efectuar la medición, consistiendo básicamente en:

- Tuerca de acople
- Tornillo de fijación de la varilla
- Caja de empaque.
- Guía de medición.
- Varilla.
- Manubrio o mecanismo de giro

Varilla de calibración. Figura No. 8

La principal característica de este accesorio, radica en que la varilla guarda una posición excéntrica en relación a la tuerca de acople y la válvula de inserción.

Por otra parte la longitud del gancho siempre debe ser de 1 " de longitud, en su extremo doblado.

Operación de la varilla calibradora.

Para determinar el diámetro interno de una tubería mediante la varilla calibradora una vez instalada la válvula de inserción, se procede de la siguiente manera:

- Se levanta totalmente la varilla calibradora hasta que tope con la tuerca de acople, esto con la finalidad de permitir el enrosque con la válvula de inserción.
- Se atornilla la tuerca de acople a la válvula de inserción marcando la posición del gancho.
- Se abre la válvula de inserción, girando la llave 1/4 de vuelta a la posición de abierto.
- Si el barril de la válvula de inserción, se encuentra muy apretado, se afloja la tuerca de ajuste una media vuelta, se golpea el eje con un martillo, tratando de sacarla, cuando gotee la válvula será señal de que el barril se aflojó y se puede proceder a girar la llave y a reapretar la tuerca de ajuste.
- Se empuja suavemente la varilla hasta que toque la superficie inferior del tubo, la operación requiere de mucho cuidado, para evitar que se destruyan incrustaciones o material depositado en el interior de la tubería, lo que causaría una determinación inexacta.
- Se baja y fija la guía de medición en el punto donde está el plano de referencia. Ver figura No. 8.
- Se sube unos centímetros la varilla y se gira un ángulo de 180°, con el objeto de que el gancho libre el borde del extremo inferior de la válvula de inserción. Se sigue levantando la varilla suavemente hasta tocar la superficie superior interna del tubo.
- El diámetro real del tubo equivale a la distancia existente que hay entre la superficie inferior de la guía de medición y el plano de referencia más 1 " (25.4 mm), que es la longitud del gancho. Figura No. 9
- Se regresa la varilla a su posición original

**Diámetro real de la tubería.
Figura No. 9**

Determinación de la proyección de la válvula de inserción.

Al instalar una válvula de inserción en una tubería, el extremo inferior se proyecta dentro del área del tubo (figura No. 10), afectando las lecturas del tubo Pitot, es por ello que dentro de los cálculos que se realizan para determinar el caudal que esta pasando por la zona de medición, se hace necesario efectuar una corrección por la proyección de la válvula, esto hay que realizarlo en la práctica para tuberías abajo de 150 mm. (T) de diámetro, ya que en diámetros mayores, la influencia de la proyección no es significativa.

Proyección de la válvula de inserción. (P.V.)

Figura No. 10

Para encontrar el valor de la proyección, a partir de la posición original del gancho calibrador, se procede de la siguiente forma:

- Se baja la varilla calibradora, hasta que el gancho calibrador libre el borde inferior de la válvula de inserción, se gira la varilla 300 y se sube hasta que tope con la válvula de inserción, se ubica la guía de medición en el plano de referencia y se fija en esa posición, se regresa la varilla a su posición original, la proyección de la válvula de inserción estará dada por la distancia existente entre la guía de medición y el plano de referencia.

Para retirar la varilla calibradora se procede de la siguiente manera:

- Baje unos centímetros la varilla para que el gancho alcance a librar el borde de la válvula de inserción, gire la varilla a la posición que tenía cuando se inició el procedimiento de determinación del diámetro real, jálela hasta que llegue a su punto superior.
- Cierre la válvula de inserción, desatornille la tuerca de acople, y retire la varilla de calibración.

1.5- Tubo Pitot Simplex.

Este equipo permite detectar y transmitir a manómetros diferenciales las cargas que actúan en una vena líquida, está compuesto básicamente de dos tubos, uno de los cuales recibe la carga de impacto (alta presión), y el otro capta la carga de referencia (baja presión); de la diferencia entre la carga de impacto y la carga de referencia, se obtiene la carga dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo en movimiento.

Los tubos Pitot se construyen en tres longitudes, siendo estas 3, 5 y pies, la selección del tubo a usar en las mediciones dependerá de diámetro exterior del tubo,

Las cargas que actúan sobre los orificios se muestran en la Figura No. 11 .

Esquema de las cargas que actúan sobre los orificios.

Figura No. 11

Uno de ellos registra la energía de impacto, equivalente a la suma de la energía de posición más la energía cinética o de velocidad del fluido dentro de la tubería, que viene siendo:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

y el otro registra únicamente la energía de posición,

$$\frac{P_2}{\gamma}$$

De la diferencia aritmética, de estos dos registros se obtiene la energía de velocidad, expresada en metros columna de líquido empleado en el manómetro "U", que es donde se visualiza la diferencial de presión "d", por lo que la velocidad queda expresada en función de esta diferencia de presión, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$V = C_p \times \sqrt{2gH} \quad A$$

$$H = \sqrt{(y_M - 1)d} \quad B$$

$$Q = V \times A$$

Substituyendo B en A

$$V = C_p \times \sqrt{2g(y_M - 1)d}$$

Donde:

Q = Gasto, en m³/seg.

C_p = Constante de calibración del tubo Pitot, adimensional.
valores: Pitot moderno C_p = 0.802; Pitot antiguo C_p 0.795.

A = Area de la sección de la tubería, en m²

g = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/seg²

y_m = Peso específico del líquido manométrico

H = "Diferencial de presión" expresado en m.

V = velocidad en m/seg.

d= Presión diferencial en mm leída en el manómetro diferencial

Substituyendo valores se tiene:

Tubo Pitot nuevo	$V = 0.802 \sqrt{2 \times 9.81} \sqrt{(y_M - 1) \cdot d}$	C
Tubo Pitot antiguo	$V = 0.795 \sqrt{2 \times 9.81} \sqrt{(y_M - 1)} \sqrt{d}$	D
Pitot nuevo	$V = 3.5524 \sqrt{(y_M - 1)} \sqrt{d}$	C'
Pitot antiguo	$V = 3.5214 \sqrt{(y_M - 1)} \sqrt{d}$	D'

Por medio de las fórmulas C' y D' es posible determinar la velocidad en una tubería, aplicando la ecuación de continuidad se obtiene el gasto.

$$Q = V \times A$$

La ecuación es aplicable a flujos no compresibles y con las siguientes condiciones:

- El flujo debe ser homogéneo y de características físicas conocidas.
- El diámetro interior de la tubería deberá determinarse con precisión.
- La tubería debe trabajar a presión (tubo lleno).

La figura No. 12 ilustra el equipo de pitometría.

Equipo de pitometría Figura No. 12

Instalación y operación del tubo Pitot.

La instalación y operación del tubo Pitot, se llevará a cabo siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

- Retire el casquillo protector de los orificios, en la parte inferior del tubo
- Verifique que los orificios de impacto y de referencia no estén obstruidos
- Deslice el tubo hacia arriba hasta que sobresalga totalmente de la tuerca unión
- Verifique que las válvulas de purga y de paso en el puerto del Pitot, estén cerradas
- Atornille a mano la tuerca de conexión del tubo sobre la válvula de inserción.
- Abra la válvula de inserción.
- Purgue de aire el tubo Pitot, abriendo y cerrando intermitentemente las llaves de purga, hasta que el agua arrojada no contenga aire.

- Empuje el tubo hasta tocar el fondo de la tubería y coloque la regla graduada para perfil de velocidades.

La graduación de la regla permite conocer la ubicación de los orificios del tubo Pitot, en cualquier punto del eje de la tubería

- Deslice el tubo Pitot para colocarlo en la posición deseada.

1.6.- Manómetro de presión diferencial

El manómetro de presión diferencial, es el instrumento que permite apreciar físicamente la magnitud (en mm. de columna del líquido) de las energías que actúan sobre los orificios del tubo Pitot, que como se vio anteriormente, son las de velocidad y la de presión de acuerdo a la figura No.11, con base en la diferencia de las presiones (deflexión) se calcula la velocidad del agua en la sección del tubo, donde se ubiquen los orificios del tubo Pitot.

El manómetro diferencial que se usa conjuntamente con el tubo Pitot Simplex (figura No. 13), consta básicamente de:

- Mangueras para conexión con el tubo Pitot
- Tubo U de vidrio
- Caja de válvulas.
- Gabinete metálico

Manómetro diferencial Figura No.13

Las mangueras son los aditamentos que interconectan el manómetro diferencial, con el tubo Pitot, y tienen las siguientes características:

- Son de hule flexible reforzadas.
- Tienen un diámetro interno de 1 /4".
- Son capaces de resistir presiones de hasta 30 Kg/cm².
- Tienen una longitud mínima de 1.5 mts.
- Cuentan con terminales con rosca para acoplarse al tubo Pitot y a la caja de válvulas del manómetro diferencial.

El tubo U conteniendo agua y alguno de los líquidos manométricos usuales, nos dan la posibilidad de apreciar físicamente la energía de velocidad existente en el punto donde están colocados los orificios del tubo Pitot en el interior de la tubería y tiene las siguientes características:

- Es un tubo de cristal tipo pyrex doblado en forma de U
- Tiene un diámetro interior de 1/4"
- Soporta una presión de hasta 20 Kg/cm²

La caja de válvulas (ver figura No. 13), es el elemento que sirve para operar el manómetro diferencial.

La caja cuenta con 5 válvulas, un par de ellas la "i" y la "r", corresponden al punto de donde se acoplan las mangueras que transmiten la presión procedente de los orificios del tubo Pitot, las "ai" y "ar" son utilizadas para purgar el aire existente en el sistema, y por último la válvula "e" permite igualar las presiones en ambos brazos del tubo U.

El sistema de acople entre el tubo U y la caja de válvulas, facilita que esta última, pueda retirarse de los extremos del tubo U, dejándolos libres para introducir los líquidos manométricos o efectuar su limpieza, esto último se debe efectuar antes y después de la utilización del manómetro y se realiza usando una escobilla y algún detergente.

Manejo del manómetro de presión diferencial.

El manejo del manómetro de presión diferencial, se efectúa de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Retire la mariposa que fija la caja de válvulas al tubo U.
- Coloque en una probeta, 30 CM³ de líquido manométrico, agregándole el colorante vegetal mínimo necesario.
- Separe la caja de válvulas del manómetro, introduzca el líquido manométrico en el tubo U, utilizando un embudo, se coloca nuevamente la caja de válvulas en su posición sobre el manómetro, y se vuelve a colocar la mariposa de fijación.
- Acople el tubo Pitot al manómetro mediante las mangueras, cuidando que "i" e "r" y "R" y "r" se unan con la misma manguera (figura No. 13).
- Verifique que las válvulas "ai", " ar", "i" y "r" del manómetro se encuentren cerradas.
- Abrir las válvulas "R" e "T" del tubo Pitot para que las cargas que actúan sobre los orificios del tubo Pitot se reflejen en los brazos del manómetro diferencial
- Abrir totalmente la válvula "e" del manómetro y proceder a abrir lentamente las válvulas "r" e "i" del manómetro.

- Se procede a extraer el aire de las mangueras y el tubo U (purgado), durante la operación debe tenerse sumo cuidado para que el líquido manométrico no pase a la tubería. Para lograr lo anterior, se cierra un lado del manómetro mientras se purga el otro, abriendo y cerrando varias veces la válvula de purga, buscando provocar con este movimiento las mayores deflexiones (se denomina deflexión a la distancia existente entre los niveles del líquido manométrico en ambos brazos del tubo U), posibles sin que el líquido manométrico escape del tubo U.
- Para purgar el otro lado del manómetro se repite el procedimiento ya descrito.
- Cuando las presiones son bajas lo anterior no sucede y es necesario graduar la válvula "e" y repetir las operaciones hasta que todo el aire haya sido expulsado.
- Para verificar que todo el aire ha sido expulsado, mantenga la válvula "e" abierta y cierre las válvulas "ar" y "ai", en este caso la deflexión debe ser cero, si esto no sucede, es indicativo, de que aun existe aire en el sistema. ,
- Para verificar si el líquido manométrico usado es el adecuado, se cierra la válvula "e" y se observa si el líquido manométrico muestra tendencia a escapar o acusa baja deflexión, en el primer caso es necesario cambiar el líquido por uno de mayor densidad y en el segundo por uno de menor densidad.

Lectura de las presiones diferenciales.

Para que las lecturas de las presiones diferenciales sean lo mas correctas posibles es necesario tomar las siguientes precauciones.

El manómetro U debe estar perfectamente limpio antes de depositar el líquido manométrico.

El Líquido manométrico no debe ser muy antiguo.

Si el líquido manométrico ya fue usado se deberá filtrar antes de reutilizarlo.

Para minimizar los errores de -paralaje, la lectura de la presión diferencial debe realizarse utilizando un flexómetro y leyendo sobre un plano horizontal, figura No. 14.

Figura No. 14

Cuando existan presiones diferenciales superiores a 40 cm. puede ser recomendable que la lectura la realicen 2 operadores, el primero hace coincidir el cero de la regla con uno de los meniscos conforme se mueve, y el otro efectúa la lectura en el momento adecuado.

El manómetro debe colocarse en posición vertical y a la sombra durante las pruebas.

1.7.- Líquidos manométricos.

Los líquidos manométricos que se usan en el manómetro U para trabajos de pitometría, tienen diferentes densidades y van desde una densidad de 0.87 para la bencina a una de 13.58 para el mercurio, usándose normalmente los siguientes

Mercurio	Densidad 13.58
Tetrabromoetano	Densidad 2.90
Tetracloruro de carbono	Densidad 1.60
Bencina (benceno)	Densidad 1.60

En cuanto a las densidades, las usuales en los estudios pitométricos son: 13.58, 2.90, 1.60, 1.25, y 1.10. Se seleccionan estas densidades en virtud de que en la literatura sobre el tema, existen tablas elaboradas para calcular la velocidad del agua en función de las densidades ya indicadas y de la presión diferencial leída en el manómetro U. (Ver anexo No. 3).

De estas densidades las tres primeras corresponden a los líquidos puros, las otras dos densidades son combinaciones que se obtienen mezclando el tetracloruro de carbono y la bencina.

Cuando se requiere obtener un líquido manométrico de densidad diferente a los líquidos manométricos puros, se usan dos métodos.

El primer método consiste en el uso de un "DENSÍMETRO", dispositivo que permite medir directamente la densidad de los líquidos en los que se introduce Figura No. 15.

Por ejemplo si se desea obtener densidades de 1.25 y 1.10 el densímetro seleccionado debe tener un rango de medición de 1.0 a 1.5.

Densímetro Figura No. 15.

Se mezclan los líquidos en un tubo Nessler de 100 ml figura No. 16.

Tubo Nessler Figura No. 16

En el tubo Nessler se introducen 0.25 lts. de tetracloruro de carbono.

Posteriormente se procede a agregar poco a poco bencina, agitándose la mezcla e introduciendo el densímetro para ir verificando su densidad, hasta que la mezcla se encuentre en 1.25 o 1.10, según la densidad que se requiera.

El segundo método es matemático y se basa en la relación existente entre las densidades y volúmenes de los líquidos por mezclar, ésta relación es la siguiente:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{y_1 - y_2}{y - y_2}$$

Donde:

V_1 y V_2 = Volúmenes de los líquidos manométricos

y_1 y y_2 = Densidades de los líquidos manométricos

y = Densidad de la mezcla

Ejemplo :

Se busca un líquido manométrico de densidad 1.25 a partir del tetracloruro de carbono y la bencina, si se tienen 0.25 lts. de tetracloruro de carbono, que volumen de bencina hay que agregar, para obtener la densidad buscada.

Datos:

Volumen de tetracloruro de carbono 0.25 lts. (V_1)

Densidad del tetracloruro de carbono 1.60 (y_1)

Densidad de la bencina 0.87 (y_2)

$$V_1 = 0.25 \qquad y_2 = 0.87$$

$$y_1 = 1.60 \qquad y = 1.25$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{y_1 - y_2}{y - y_2}$$

$$V_2 = \left(\frac{y_1 - y_2}{y - y_2} \right) \times V_1$$

$$V_2 = \left(\frac{1.60 - 0.87}{1.25 - 0.87} \right) \times 0.25$$

$$V_2 = 0.48 \text{ lts.}$$

Por lo tanto, para obtener un líquido manométrico de 1.25 de densidad, es necesario agregarle a los 0.25 lts. de tetracloruro de carbono 0.48 lts. de bencina.

Por otra parte se puede verificar la densidad de un líquido manométrico mediante el tubo U, usando el siguiente método:

Se coloca el líquido manométrico dentro del tubo U.

Se agrega agua en cada uno de los extremos del tubo U. cuidando de agregar una cantidad mayor en uno de ellos para que se produzca una diferencia de presión, con respecto al líquido manométrico Figura No. 17.

**VERIFICACIÓN DEL PESO ESPECIFICO
POR MEDIO DEL MANÓMETRO U.
FIGURA No. 17**

Es recomendable que la diferencia de presión sea lo más grande posible.

De acuerdo con la figura anterior, la densidad del líquido se calcula de acuerdo a lo siguiente:

$$a y = b y + c$$

Dividiendo entre y

$$\frac{a y}{y} = \frac{b y + c y_m}{y}$$

Simplificando, obtenemos:

$$a = b + c \frac{y_m}{y}$$

Como:

$$\frac{y_m}{y} = \rho$$

tenemos:

$$a = b + c \rho$$

Despejando a ρ

$$\rho = \frac{a - b}{c}$$

Donde:

ρ = densidad del líquido manométrico.

a = longitud de la columna mayor de agua en mm.

b = longitud de la columna menor de agua en mm.

c = longitud de la deflexión del líquido manométrico en mm.

γ = Peso específico del agua.

γ_M = Peso específico del líquido manométrico.

Por otra parte puede suceder que en el campo, el líquido manométrico no conserve su densidad, debido principalmente a las variaciones de temperatura, por lo que al terminar el aforo, se debe realizar esta verificación y el valor obtenido será usado en el cálculo del caudal

1.8.- Registrador de velocidad Simplex.

Cuando se requiere conocer el caudal que pasa por un conducto a través del tiempo, se usa el registrador de velocidad el cual es un instrumento que recibe las presiones diferenciales obtenidas por el tubo Pitot y las transforma en velocidades, registrándolas en una carta circular acotada en pies/seg., estas cartas se imprimen para una duración de 7 días o 24 hrs, lo mas común es usar la de 24 hrs.

Con estas cartas se puede conocer la velocidad en cualquier momento y en consecuencia se puede calcular el gasto que está pasando por el punto en ese momento.

Por otra parte sirven de base para conocer el volumen que pasó por la tubería en el lapso de tiempo que cubre la carta gráfica.

Los principales elementos que integran este instrumento son los siguientes: ver figura No. 18.

- Cámara
- Flotador Simplex.
- Cuadrante.
- Gráfico y mecanismo de relojería.
- Cubierta del registrador.

FIGURA No. 18

El equipo está diseñado de tal forma, que al estar en funcionamiento las cargas de alta presión (impacto), inciden sobre la región externa del flotador y la presión de baja (Referencia) la efectúe sobre la región interna de la campana del flotador Simplex.

La acción de estas fuerzas sobre el flotador, más el peso propio originan una resultante vertical, que es equilibrada por el empuje que recibe del mercurio contenido en la cámara.

El movimiento de; flotador es transmitido al brazo registrador mediante una cremallera, la cual hace girar el brazo que contiene la plumilla y marca la velocidad del flujo en la gráfica.

Tipos de registradores de velocidad.

Existen dos tipos de registradores de velocidad:

- El registrador antiguo, que se calibra con dos tubos de prueba.
- El registrador de la nueva generación, que se calibra con un contrapeso.

A continuación se describe la instalación y calibración de los registradores de velocidad.

Instalación y calibración del registrador de velocidad antiguo.

Para la instalación del registrador se requiere de una superficie sensiblemente plana y seguir el siguiente procedimiento.

Se retira la cubierta del registrador, presionando el seguro localizado en la parte superior de la tapa. (figura No. 19)

RETIRO DE LA CUBIERTA DE PROTECCIÓN FIGURA No. 19

Se retira el asa de transporte, quitando las tres tuercas que la sujetan al cuerpo del registrador. (figura No. 20)

RETIRO DEL ASA DE TRANSPORTE FIGURA No. 20

Se revisa que todas las válvulas del registrador estén cerradas. (figura No. 21)

FIGURA No. 21

Se retira el resorte que mantiene fijo al flotador Simplex dentro de la cámara del registrador, para ello, se quitan los 6 tornillos que sujetan la tapa del aparato, se levanta la tapa y retira el resorte, una vez realizado esto se vuelve a colocar la tapa y se aprietan los 6 tornillos.(figuras No. 22 y 23)

FIGURA No. 22

FIGURA No. 23

Se carga el registrador con el mercurio (la cantidad requerida viene marcada en la cubierta), para ello se procederá de la forma siguiente:

Se checa que el tapón para drenar la cámara del registrador esté en su sitio y apretado.

Se procede a verificar que el mercurio esté limpio, en caso de que no sea así, se filtrará, para posteriormente cargarlo en el registrador, a través del embudo de carga del aparato.

Se nivela el registrador, por medio de las tres patas que lo sostienen, las cuales tienen ajuste tomando como referencia el nivel de burbuja que se encuentra en la parte superior del aparato. (figura No. 24)

FIGURA No. 24

Se conectan las mangueras de tubo Pitot en el block de conexiones, cuidando que la línea de alta presión se conecte del lado izquierdo, viendo el registrador de frente y la de baja presión del lado derecho. Figura No. 21.

Se abren las válvulas i y E en el block de conexiones. Figura No. 21

Purgado del registrador.

Para purgar el registrador, se procede de la siguiente forma: Se abren y cierran intermitentemente las válvulas de purga Ma y Ah, hasta que el agua expulsada no contenga aire. Figura No. 21 y 25.

PURGA DEL REGISTRADOR.

FIGURA No. 25

Posteriormente se purga el flotador para lo cual se quita el tapón A ubicado en el centro de la tapa superior del registrador, esto da acceso al pivote de purga del flotador, el cual se oprime varias veces hasta que el agua expulsada no contenga aire, ya purgado se reinstala el tapón A.

Gráfica de velocidad.

Descripción e Instalación.

La gráfica de velocidad (ver figura No. 26) viene indicada en pies/seg. Su rango de medición es de 0-11, estando dividida en franjas de 15 minutos (96 lecturas de 1/4 de hr. dando un total de 24 hrs.).

Instalación.

Se da cuerda al sistema de relojería.

Se coloca la gráfica circular en la carátula del registrador, figura No. 21. Se instala el brazo del registrador con su plumilla, haciendo coincidir su punto con el inicio de un radio, girándola con la mano alrededor de su eje, verificando que el recorrido del punto coincida con el radio de la gráfica, si esto no sucede, se deberá proceder a su ajuste moviendo la posición de la plumilla con el tornillo de ajuste que viene en su base y que se opera mediante una llave allen.

La plumilla debe ejercer cierta presión sobre la superficie de la gráfica, pero no demasiada, porque puede ocasionar un dibujo defectuoso, para efectuar el ajuste, se mueve el centro de la pluma hacia afuera o hacia adentro de la flecha.

GRÁFICA DE VELOCIDAD FIGURA No. 26

Calibración.

Después de haberlo cargado con mercurio, nivelado, purgado, colocado gráfica y plumilla, se procede a la calibración, para esto se sigue el procedimiento descrito a continuación:

Coloque los dos tubos de prueba de cristal (GT) y (GM) con su regla o escala en las válvulas Mg y Tg del registrador como se ve en la figura No. 21. Los tubos deben quedar verticales y la escala graduada que traen quedará sujeta a ellos con sus pinzas. Figura No. 27.

FIGURA No. 27

La escala graduada viene marcada en 0, 2 y 6 que corresponden en la gráfica a los valores de la velocidad del agua en la tubería en pies/seg.

NOTA:

Para calibrar el registrador es necesario conocer la velocidad del agua en la tubería, esto se logra deduciéndola del gasto aforado con el Pitot y conociendo el diámetro real calibrado de la tubería, aplicando la ecuación de continuidad.

$$Q = V \cdot A.$$

Si la velocidad del agua es menor a 2 pies por segundo, la calibración se realizará en los tubos de prueba de (0 a 2) y si es mayor, la calibración se hará de (0 a 6).

Lo anterior quiere decir que se simularán en el registrador estos límites de velocidad, mismos que se visualizarán en los tubos de prueba, y se marcarán en la gráfica.

Para llevar a cabo lo anterior, se ejecutará el siguiente procedimiento:

Abra las válvulas Mg y Tg, para permitir el acceso del agua a los tubos de prueba GT y GM. Figura No.21

Abra las válvulas i y R lentamente en el bloque de conexiones, así como el by pass E, esto hará que el agua vaya llenando los tubos de prueba prácticamente en forma paralela.

Cuando los meniscos del agua en los tubos se aproximen a la marca de cero en la escala, cierre lentamente la válvula i para conseguir que ambos meniscos se estabilicen en la marca 0, si los meniscos sobrepasan ésta marca se abre la válvula AT en el bloque

de conexiones, lo que permitirá que los meniscos desciendan cerrándola en el momento en que esto se consiga.

Ajuste el brazo de la pluma de tal manera que el punto de la plumilla coincida con el cero en la gráfica, esto se logra moviendo el tornillo de ajuste tangencial del brazo de la pluma, en el sentido requerido para conseguir el ajuste a cero.

El siguiente paso es calibrar el registrador con los tubos de prueba en (2, 6 ó 6), según lo requiera la velocidad del agua en el conducto.

Para ello es necesario dejar en la marca cero el menisco correspondiente al tubo de prueba GM o sea el del lado derecho viendo el registrador de frente, y llevar el menisco del otro tubo GT a la marca 2 ó 6.

Para lograr lo anterior se procede de la siguiente forma:

Se cierra la válvula By-pass (E) del block de conexiones, enseguida se procede a abrir lentamente la válvula AT, con éste movimiento empiezan a descender los meniscos en ambos tubos, el de GT más rápidamente que el de GM, y es necesario volver a ajustar éste último menisco a la marca cero, para ello, se abre con mucho cuidado la válvula i y se juega con ella para mantener el menisco en esa marca, hasta que el menisco del tubo GT llegue a la marca preestablecida (2 ó 6), en ese momento se cierran ambas válvulas.

Conseguido lo anterior se ajusta el brazo de la pluma de manera que el punto de la plumilla, coincida con el punto en que se calibraron los tubos de prueba (2 ó 6), el ajuste se lleva a cabo con el tornillo tangencial

Se cierran las válvulas TG y MG de los tubos de prueba, se retiran éstos y el aparato queda listo para trabajar, abriendo totalmente las válvulas i y R del block de conexiones.

Instalación y calibración del registrador de la nueva generación Figura No. 28.

Este equipo denominado de la nueva generación, es similar en su funcionamiento al registrador de velocidad llamado antiguo, con la diferencia de que para calibrarlo solo se calibra con un contrapeso, y no con los tubos de prueba con el que se calibra el aparato antiguo, siendo esta operación más sencilla, fácil y rápida de efectuar.

Una vez nivelado, cargado de mercurio, purgado y colocado gráfica y plumilla al registrador de acuerdo al procedimiento ya descrito para el registrador antiguo, se procede a su calibración.

Calibración del registrador de la nueva generación.

Para la calibración de éste registrador se simularán límites de velocidad entre cero y dos pies/seg., lo cual se logra con un contrapeso, que forma parte del registrador (Figura No. 28).

El procedimiento a seguir será el siguiente:

Se cierran las válvulas i y E en el registrador, y se abre la válvula By-pass.

Retire la tapa de la parte superior del cilindro del registrador (quitando los 6 tornillos que la mantienen sujeta al cilindro).

Ajuste el brazo de la pluma de tal manera que el punto de la plumilla coincida con el cero en gráfica, esto se logra moviendo el tornillo de ajuste tangencial del brazo de la pluma, en el sentido requerido para conseguir el ajuste a cero.

Retire el contrapeso que se encuentra en la base del registrador. Cierre la válvula By-pass, y coloque el contrapeso sobre la barra superior del flotador.

Permita que el flotador que se encuentra suspendido en el mercurio, se estabilice. Aplique una ligera presión hacia abajo para que el contrapeso se sumerja, si fuera necesario repita esta operación varias veces, hasta que el punto de la plumilla marque la velocidad requerida (2 pies/seg.). Si no coincide, corrija y ajuste con el tornillo tangencial del brazo de la pluma.

Retire el contrapeso y vuélvalo a colocar en su sitio.

Reinstale la tapa superior, apretando los 6 tornillos que fijan la tapa al cilindro.

Para poner el registrador en servicio abra las válvulas i y E en el bloque de conexiones del registrador

REGISTRADOR MODERNO. FIGURA No. 28

Desmontaje del registrador de velocidad.

Después de haber efectuado las observaciones, el procedimiento para desmontar el equipo de la estación de medición es el siguiente:

Cierre las válvulas (i) y (R) en el tubo Pitot, desconecte las mangueras del registrador.

Drene el mercurio y el agua del registrador, con una manguera conectando una de las puntas al niple de desfogue que se encuentra en la parte inferior del equipo, y la otra punta descargando a un depósito. Abra la válvula (Ah) localizada en la parte superior del registrador, y el tapón del drenaje hasta que la cámara quede vacía, separe el agua del mercurio, y guárdelo en su depósito. (Figura No. 29)

FIGURA No. 29

Vuelva a poner el resorte al flotador antes de mover el aparato, y coloque la cubierta de protección,

1.9- Registrador de presión diferencial con células tipo Dri-Flo o Barton.

Son equipos portátiles destinados a registrar presiones diferenciales, los mas usados en pitometría son los denominados de célula Dri-Flo o Barton. (Figura No. 30).

FIGURA No. 30

Las presiones diferenciales son generadas; por cualquier medidor de tipo deprimógeno y registradas gráficamente.

Las presiones diferenciales se registran en gráficas circulares, las cuales tienen diámetros de 200 a 300 mm., pudiendo regularse para 96 minutos, 24 horas a 7 días (Figura No. 31).

CARTA GRÁFICA FIGURA No. 31

Estos equipos se consiguen con los siguientes rangos de medición, 0-10, 0-20, 0-50, 0-100, 0-200, 0-300, y 0-400, pulgadas columna de agua de presión diferencial.

Principio de funcionamiento.

Estos registradores poseen protección contra presiones diferenciales superiores o inferiores a las de la escala, fuelles que en su interior contienen un líquido denominado etileno-glicol. Los fuelles se interconectan mediante un orificio anular que permite en forma restringida el paso del líquido de un fuelle a otro, además están intercomunicados por un eje. Cuando las presiones actúan sobre las cámaras, el fuelle de alta presión se contrae forzando al etileno glicol, a pasar por el orificio anular al fuelle de baja presión, lo que ocasiona que el fuelle de baja presión se expanda, y el eje central se mueva en dirección de la cámara de baja presión, éste movimiento se transmite hasta el mecanismo de registro, en cuya gráfica quedan indicadas las diferenciales de presión en % del rango del aparato.

Selección e instalación del registrador.

El registrador adecuado será aquel en el que las presiones diferenciales no sobrepasen el 90% del rango máximo o sean inferiores al 10% de dicho rango, en el caso de no tener datos previos es necesario realizar una o más mediciones instantáneas de presión diferencial con el equipo Pitot.

Para la instalación se procede de la siguiente forma:

Verifique el sentido del flujo, e instale el tubo Pitot en ese sentido

Conecte las mangueras del tubo Pitot al registrador, cuidando que la manguera que recibe la presión de impacto se conecte a la cámara de alta presión del registrador. (Figura No. 33).

Abra las válvulas i y R del tubo Pitot.

Abra las válvulas de purga Ai y Ar hasta que el agua expulsada no contenga aire. Cierre las válvulas.

Abra la puerta del frente del registrador, donde se encuentra el mecanismo de relojería, de la cuerda, e instale una carta - gráfica. Para esto, aleje la pluma moviendo el soporte de la misma y destrabe el fijador de la carta ubicado en el centro del soporte.

Ubique la carta de manera que el punto de la pluma quede situado en la hora de inicio. Trabe el fijador de la carta - gráfica, retire el soporte de la pluma y verifique si ésta última está funcionando bien. (Figura No. 33).

FIGURA No. 33

Cierre las válvulas i1, i2, i3, RI, R2, R3 y abra las válvulas E, i4, R4 en el registrador. (Figura No. 32).

Figura No. 32

Abra las válvulas i1 y RI del registrador. Figura No. 32.

Abra las válvulas de purga i2 y R2 en el registrador, hasta que el agua expulsada no contenga aire, cierre las válvulas.

Abra lentamente la válvula i3, siguiendo al mismo tiempo con la vista, el movimiento de la pluma en la carta gráfica. La pluma no debe sobrepasar el límite de la escala, lo que se consigue controlando la válvula i3, continúe ésta operación hasta que las cámaras de baja y alta presión estén llenas de agua, lo que se percibirá cuando comience a salir agua por las mangueras de rebose Si y SR. Abrase poco la válvula R3 y ciérrela en seguida.

Cierre lentamente las válvulas i4 y R4, simultáneamente, controle éste cierre de modo que la pluma no salga de los límites del rango.

Abra totalmente la válvula i3 y abra la válvula R3

Abra parcial y lentamente las válvulas R4 e i4, simultáneamente, controlando siempre que la pluma no salga de los límites del rango. Deje fluir el agua hasta que el agua expulsada no contenga aire, cierre con el mismo cuidado las válvulas R4 e i4.

Cierre la válvula E. Si el aparato ha sido bien instalado la pluma marcará una cierta presión diferencial en la carta.

Anote en la carta - gráfica todos los datos de interés, como son nombre de la estación de aforo, fecha y la hora de inicio del registro del caudal.

Determinación del caudal.

Los aparatos registradores con célula Dri-Flo ó Barton que se utilizan para las mediciones de gasto, son equipos portátiles destinados a registrar presiones diferenciales en una carta gráfica, cuya revolución completa puede regularse a 96 minutos, 24 horas ó 7 días.

Las presiones diferenciales pueden ser generadas por cualquier medidor del tipo deprimógeno como vénturi, tobera, placa de orificio, tubo Pitot, 6 por cualquier otro elemento primario que genere presión diferencial

El cálculo del caudal, a través de un registrador de presión diferencial acoplado al Pitot, se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento.

Se realiza un aforo puntual con el equipo de pitometría, para conocer los valores de la velocidad en toda la sección del tubo.

Con los valores anteriores se calcula el coeficiente de velocidad C_v , que equivale al valor que resulta de dividir el promedio de las velocidades en los anillos, entre la velocidad central.

Para calcular el caudal que pasa por un conducto, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$v = C_p \sqrt{2gR} \dots\dots 1$$

Donde:

v = Velocidad puntual del agua en el conducto (m/seg)

C_p = Coeficiente del tubo Pitot.(0.795-0.802) a dimensional

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/seg²)

R = Valor máximo del rango del registrador de presión diferencial (10, 20, 50, 100, 150, etc) m.c.a.

$$y \quad Q = C_v \times V \times A \times L \dots\dots 2$$

Q = Caudal (m³/seg)

C_v = Coeficiente de velocidad (adimensional)

V = Velocidad del agua en el conducto

A = Área calibrada del tubo (m²)

L = Lectura en la gráfica (adimensional)

substituyendo 1 en 2 obtenemos:

$$Q = C_v \times C_p \sqrt{2gR} \times A \times L \dots\dots 3$$

Ecuación con la cuál se calcula el, caudal, que pasa por la estación de medición, en función de los valores marcados en la gráfica.

2.- PROCEDIMIENTO PARA EL AFORO CON EQUIPO DE PITOMETRÍA

En los temas vistos anteriormente, se describieron (os diferentes instrumentos que integran el equipo pitométrico para realizar aforos en tuberías trabajando a presión, así como su manejo.

Durante la descripción del procedimiento para ejecutar un aforo, se hará referencia al equipo de pitometría, el cual ya fue descrito anteriormente, por tal motivo solamente se hará mención al inciso en el cual se describió e indicó su manejo.

A continuación se plantea el procedimiento para realizar el aforo.

2.1.- Selección del punto de aforo.

Cualquier elemento de medición, requiere para dar información confiable, que las condiciones del flujo sean lo mas uniformes posibles, es decir, que el régimen de flujo no sea turbulento, para garantizar esto se requiere que el sitio seleccionado para efectuar el aforo, cumpla con ciertas distancias mínimas especificadas antes y después de cualquier pieza especial o cambio de dirección, la distancia mínima que debe guardar el sitio deberá ser de 5 y 10 diámetros, antes y después respectivamente.

2.2.- Instalación de la válvula de inserción. ,

Una vez seleccionado el punto para el aforo, se procede a instalar la válvula de inserción, usando la máquina insercionadora Mueller, el uso y manejo de este equipo se describió en los incisos 1.2 y 1.3.

2.3.- Medición del diámetro efectivo del tubo.

El caudal que pasa por cualquier sección de un conducto, es directamente proporcional a su área y a su velocidad, por ello, es fundamental conocer el área de la sección donde se pretende realizar el aforo, para lograr lo anterior, una vez instalada la válvula de inserción, se procede a medir el diámetro interno del tubo, con base en esta información es posible determinar el área de paso del fluido. Esta medición se efectúa usando la varilla calibradora, el manejo de este aditamento se trató en el inciso 1.4.

2.4.- Instalación de tubo Pitot y conexión del manómetro diferencial.

Para poder calcular el caudal que pasa por un conducto, es necesario conocer el área de la sección y la velocidad que lleva el fluido en ese punto, ya se vio que el área se conoce mediante el uso de la varilla calibradora, solo restaría conocer la velocidad que lleva el fluido, para ello, es necesario recurrir al uso de tubo Pitot y del manómetro de presión diferencial para calcular indirectamente la velocidad de fluido, el manejo de estos equipos se describió en los incisos 1, 5, 1.6, y 1.7.

Para determinar el caudal que pasa por el conducto se aplica la relación:

$$Q=AV$$

donde:

- Q** es el caudal que pasa por el punto de aforo
- A** es el área del conducto en el punto de aforo
- V** es la velocidad del fluido en el punto de aforo

3.- EJEMPLO.

3.1.- Procedimiento para el aforo.

A continuación se describe el procedimiento para determinar la velocidad que lleva el agua en el conducto.

Es conveniente recordar que la velocidad del agua dentro de tubo, no es uniforme, sino que, en condiciones ideales observa una forma parabólica; esto es en el centro del tubo, la velocidad tiene un valor máximo, mismo que va disminuyendo conforme se acerca a la pared del tubo. Para lograr lo anterior se procede de la siguiente forma:

Se divide el área de tubo en "N" anillos de igual área, y se efectúan observaciones pitométricas en el centro de cada uno de los anillos.

El número de anillos en que se divide el área del tubo, está directamente relacionado con el diámetro del tubo, es así como los fabricantes de equipo de pitometría recomiendan para cada diámetro el número de anillos mínimo en que debe dividirse, de acuerdo al siguiente cuadro.

CUADRO QUE INDICA EL NUMERO DE ANILLOS	
Diámetro Nominal en pulgadas	Número de anillos
60	9
54	9
48	8
42	8
36	8
30	7
24	7
20	7
18	6
16	6
14	6
12	5
10	5
8	5
6	5
5	5
4	5

El siguiente paso es definir a partir de; centro de la tubería, las distancias a las que se colocaran los orificios del Pitot, los fabricantes de equipo de pitometría recomiendan el uso de una tabla en la que vienen indicadas estas distancias (anexo No. 1)

Para el caso de que no se cuente con la tabla, se puede aplicar la siguiente expresión, para encontrar la posición de los orificios del tubo Pitot en el anillo "n".

$$\sqrt{\frac{(2n - 1) \times D}{2N}}$$

donde:

n= Número de; anillo (1n) numerados a partir de; anillo central.

N = Número de anillos en que se divide el área del tubo de acuerdo a la tabla anterior.

D = Diámetro del tubo en pulgadas.

3.- Ejemplo:

Ejemplo de aplicación de la expresión anterior.

Se requiere determinar la posición en la que se deberán colocar los orificios del tubo Pitot, para realizar la observación en el anillo No. 1, en una tubería de 30" de diámetro.

De acuerdo al cuadro que indica el número de anillos en que se deberá dividir el área del tubo, un tubo de 30" se dividirá en 7 anillos.

Substituyendo en la expresión los datos necesarios se obtiene:

$$\sqrt{\frac{(2 \times 1) - 1}{2 \times 7} \times \frac{30}{2}}$$

Realizando las operaciones, se obtiene que la posición de los orificios está a 4" a partir del centro del tubo, distancia que es similar a la que viene indicada en la tabla del Anexo No. 1, es importante acotar que las observaciones se realizan en la parte superior e inferior del anillo, por lo tanto ésta distancia se medirá hacia arriba y hacia abajo del centro del tubo para ejecutar las observaciones pitométricas. Figura No. 34, cambiando los valores de "n" para cada anillo, se irán obteniendo las posiciones para los diferentes anillos.

FIGURA No. 34.

Una vez definida la posición en que se colocarán los orificios del tubo Pitot para cada uno de los anillos, se procede a realizar las observaciones para calcular y dibujar la curva de velocidad, así como el cálculo del caudal que pasa por el conducto. Para ello se usa la forma "Registro de Aforo Pitométrico", que se presenta en el Anexo No. 2.

Descripción de la forma de registro de aforo pitométrico.

La forma de registro de aforo pitométrico inicia con un encabezado en el que aparecen 4 recuadros con la siguiente información:

Recuadro 1, de izquierda a derecha:

- Información general de la instalación en donde se realizará el aforo, incluye el nombre de la instalación y su ubicación.

Recuadro 2:

- Datos específicos del punto que se afora, del líquido manométrico que se usará, incluye: diámetro nominal del tubo, diámetro calibrado del tubo, área del tubo en la sección de aforo (con el diámetro calibrado) y el peso específico del líquido manométrico que se usará. Recuadro 3:
- Fórmulas que sirven para calcular la velocidad en cada uno de los puntos en que se posicionarán los orificios del Pitot y los coeficientes de velocidad

$$V = C_p \times \sqrt{2g(\gamma_M - 1) d}$$

- El valor del coeficiente del Pitot C_p dependerá de la constante constructiva del Pitot de que se disponga.

donde:

V = Velocidad del líquido en m/seg

C_p = Constante constructiva del tubo Pitot que se usa. Adimensional

g = Aceleración de la gravedad. m/seg²

γ_m = Peso específico del líquido manométrico usado . gr/cm³

d = Presión diferencial leída en el manómetro U. mm.

Nota : El valor del coeficiente del tubo Pitot (C_p) dependerá de la constante constructiva del tubo Pitot, que se esté usando.

$$C = V_m/V_c$$

C = Coeficiente de velocidad, calculado a partir de los promedios de las columnas V_m/V_c , donde V_m es el valor medio de la velocidad en cada uno de los anillos y V_c el valor de la velocidad en el centro de la tubería.

C_v que corresponde al valor del coeficiente de velocidad obtenido a partir de la curva de velocidades, éste valor es el promedio de las velocidades de la curva ajustada.

Recuadro 4

En este recuadro se consignan los siguientes datos:

Fecha, aquí se anotará la fecha en que se realizó el aforo.

Hora 1, se indicará la hora del inicio del aforo.

Hora F, se indicará la hora en que se finalizó el aforo.

N E, se indicará el nivel estático del agua en el pozo.

N D, se indicará el nivel dinámico del agua en el pozo.

Operador, se indicará el nombre del operador que realizó el aforo.

Abajo de los recuadros ya mencionados, el registro se divide en 2 secciones, en la izquierda de la hoja se consignan los datos que arrojan las mediciones pitométricas, así como los cálculos derivados de ellas; en la derecha que es una hoja para graficar, se dibuja la curva de velocidades ajustada.

A continuación se describen ambas secciones.

Sección izquierda.

Esta sección está dividida en 7 columnas denominadas de acuerdo a lo siguiente:

Columna n.

En ésta columna los renglones están numerados a partir del centro, del 1 al 9 hacia arriba y del -1 al -9 hacia abajo, los números corresponden al número de anillos en que se dividirá el tubo para realizar las mediciones pitométricas, tanto para la parte superior del anillo como para la inferior, el número de renglones que es de 9 permite de acuerdo al anexo No. 1, efectuar mediciones en tuberías de 4" hasta 68".

Columna R.

En ésta columna, se anotarán para cada uno de los anillos en que se haya dividido la sección del tubo, la distancia a la que se deberán colocar los orificios del tubo Pitot para leer la diferencial de presión, las distancias están indicadas en el anexo No. 1, también con la letra R.

Columna d.

En esta columna se anotarán para cada posición de los orificios indicados en la columna R, el valor de la diferencial de presión obtenida en el manómetro U en mm.

Columna dc.

En esta columna se anotarán los valores de la presión diferencial que registra el manómetro diferencial cuando los orificios del tubo Pitot se encuentran en el centro de la tubería.

Es importante indicar que las lecturas se inician en el centro del tubo, esta primera lectura que se obtenga corresponde a $dc(1)$, después se llevan los orificios a la posición indicada como $R(+)$ anotando esta lectura en $d(+)$, se regresan los orificios del tubo Pitot al centro de la tubería anotando esta lectura la cual corresponderá en $dc(-1)$, después se llevan los orificios a la posición $R(-)$ tomando la lectura la cual corresponderá a $d(-)$, se regresan de nuevo los orificios del tubo Pitot al centro de la tubería y se lee el manómetro diferencial correspondiendo esta lectura a la posición $dc(2)$, se llevan los orificios del tubo Pitot a la posición marcada con R2 tomando esta lectura y anotándola en $d(2)$, se regresan los orificios del tubo Pitot al centro del tubo tomando y anotando esta lectura en $dc(-2)$, se llevan los orificios a la posición $R(-2)$, se toma esta lectura y se anota en $d(-2)$.

Se prosigue con esta secuencia hasta terminar con el número de anillos dependiendo del diámetro de la tubería.

Columna V_m .

Representa la velocidad media del flujo, se calcula tomando en cuenta las diferenciales de presión de la columna d para cada uno de los puntos, aplicando la fórmula que viene en el recuadro 3, o usando las tablas del anexo No. 3, posteriormente se suman los valores de V_m y se calcula su promedio, anotando éste en la parte inferior de la tabla.

Columna V_c .

Esta columna V_c representa la velocidad central de fluido, calculándose en función de las diferenciales de presión de la columna d_c para cada uno de los puntos, aplicando la fórmula que viene en el recuadro 3 o usando las tablas del anexo No. 3, posteriormente se suman los valores de V_c y se calcula su promedio, anotando éste en la parte inferior de la tabla. Generalmente estos valores resultan constantes para todos los anillos en aforos instantáneos, pero en ocasiones tienden a variar, por lo que deberá anotarse el valor que resulte y calcular su promedio.

Columna V_m/V_c

En esta columna se registrará el valor que resulte de dividir por renglones los valores de las columnas V_m entre V_c .

Sección derecha.

En esta sección se presenta una gráfica en papel semilogarítmico, en cuyo eje vertical de lado derecho se encuentran indicados los anillos que sirvieron para efectuar las lecturas de las presiones diferenciales, en el manómetro U, partiendo de cero a 9 y de cero a -9 en el eje horizontal, los valores del coeficiente V_m/V_c .

En la gráfica se ubicarán los puntos correspondientes al valor de cada uno de los anillos con el valor del coeficiente V_m/V_c correspondiente.

Una vez ubicados todos los puntos en la gráfica, se procede a dibujar la parábola que más se ajuste a los puntos ya localizados, esta parábola deberá de ser lo más uniforme posible. La parábola que resulte, definirá, unos nuevos valores de V_m/V_c en los puntos en que se cruza con las líneas de los anillos representados en el eje vertical del lado derecho, estos nuevos valores se anotarán en la columna denominada "numero de anillos" localizada en la parte izquierda de la gráfica se suman estos valores y se encuentra su promedio el cual corresponde a C_v .

Para determinar el gasto que fluye por el conducto se multiplica el área real del tubo por el promedio de la columna (V_c) velocidad central promedio y por el coeficiente de velocidad (C_v) de la tubería, anotándose el valor en el recuadro inferior de la sección izquierda, así como el valor de la presión manométrica registrada en el conducto.

En la parte de anexos se encuentran, el anexo No. 1 correspondiente a la tabla de localización de orificios, anexo No.2 encontramos una forma de registro de aforo y un ejemplo de aforo pitométrico y como anexo No.3 tenemos las tablas de deflexiones - velocidades, para diferentes líquidos manométricos.

ANEXO No. 1

TABLA DE LOCALIZACION DE ORIFICIOS PARA OBSERVACIONES PITOMETRICAS, BASADAS EN EL DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO DIMENSIONES EN PULGADAS.

ANEXO No. 2

**1er. REGISTRO DE AFORO PITOMETRICO
2º. REGISTRO DE AFORO PITOMETRICO**

ANEXO No. 3

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS

**TABLA DE LOCALIZACION DE ORIFICIOS PARA OBSERVACIONES PITOMETRICAS,
BASADAS EN EL DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO**

DIMENSIONES EN PULGADAS

Diam. de	No. De	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Tubería	Anillos									
en pulgadas										
60	9	7.08	12.24	15.84	18.69	21.21	23.46	25.20	27.36	29.13
54	9	6.37	11.02	14.25	16.82	19.09	21.12	22.95	24.62	26.20
48	8	6.00	10.40	13.39	15.86	18.00	19.90	21.62	23.20	
42	8	5.25	9.10	11.72	13.88	15.75	17.39	18.92	20.31	
36	8	4.50	7.79	10.04	11.90	13.50	14.91	16.22	17.40	
30	7	4.00	6.94	8.95	10.61	12.03	13.28	14.46		
24	7	3.21	5.56	7.17	8.48	9.62	10.63	11.56		
20	7	2.67	4.63	5.97	7.07	8.02	8.86	9.64		
18	6	2.59	4.50	5.80	6.88	7.79	8.60			
16	6	2.30	4.00	5.17	6.12	6.93	7.65			
14	6	2.02	3-50	4.52	5.35	6.16	6.69			
12	5	1.90	3.28	4.24	5.02	5.70				
10	5	1.58	2.74	3.54	4.18	4.74				
8	5	1.26	2.19	2.83	3.35	3.80				
6	5	0.95	1.64	2.12	2.51	2.85				
5	5	0.79	1.37	1.77	2.99	2.37				
4	5	0.63	1.09	1.41	1.67	1.90				

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
10	0.11234	0.17762	0.22467	0.27517	0.49734	1.25998
11	0.11782	0.18629	0.23564	0.28860	0.52161	1.32147
12	0.12306	0.19457	0.24612	0.30143	0.54480	1.38023
13	0.12808	0.20252	0.25617	0.31374	0.56705	1.43659
14	0.13292	0.21016	0.26584	0.32558	0.58846	1.49082
15	0.13758	0.21754	0.27517	0.33701	0.60911	1.54315
16	0.14210	0.22467	0.28419	0.34806	0.62909	1.59376
17	0.14647	0.23159	0.29294	0.35877	0.64845	1.64281
18	0.15072	0.23830	0.30143	0.36918	0.66725	1.69043
19	0.15485	0.24483	0.30969	0.37929	0.68553	1.73676
20	0.15887	0.25119	0.31774	0.38915	0.70334	1.78187
21	0.16279	0.25740	0.32558	0.39876	0.72071	1.82588
22	0.16662	0.26345	0.33324	0.40814	0.73767	1.86885
23	0.17037	0.26937	0.34073	0.41731	0.75425	1.91085
24	0.17403	0.27517	0.34806	0.42629	0.77047	1.95195
25	0.17762	0.28084	0.35524	0.43508	0.78636	1.99220
26	0.18114	0.28640	0.36228	0.44369	0.80193	2.03165
27	0.18459	0.29186	0.36918	0.45215	0.81721	2.07035
28	0.18798	0.29722	0.37595	0.46044	0.83220	2.10834
29	0.19130	0.30248	0.38261	0.46859	0.84693	2.14566
30	0.19457	0.30765	0.38915	0.47660	0.86141	2.18234
31	0.19779	0.31273	0.39558	0.48448	0.87565	2.21842
32	0.20095	0.31774	0.40191	0.49223	0.88966	2.25391
33	0.20407	0.32266	0.40814	0.49987	0.90346	2.28886
34	0.20714	0.32752	0.41428	0.50738	0.91704	2.32328
35	0.21016	0.33230	0.42033	0.51479	0.93043	2.35720
36	0.21314	0.33701	0.42629	0.52209	0.94363	2.39064
37	0.21608	0.34166	0.43217	0.52930	0.95664	2.42361
38	0.21898	0.34625	0.43797	0.53640	0.96949	2.45614
39	0.22185	0.35077	0.44369	0.54341	0.98216	2.48825
40	0.22467	0.35524	0.44935	0.55034	0.99467	2.51995
41	0.22746	0.35965	0.45493	0.55717	1.00703	2.55126
42	0.23022	0.36401	0.46044	0.56393	1.01924	2.58218
43	0.23295	0.36832	0.46589	0.57060	1.03130	2.61274
44	0.23564	0.37258	0.47128	0.57720	1.04322	2.64295
45	0.23830	0.37679	0.47660	0.58372	1.05501	2.67281
46	0.24094	0.38095	0.48187	0.59017	1.06667	2.70235
47	0.24354	0.38507	0.48708	0.59655	1.07820	2.73156
48	0.24612	0.38915	0.49223	0.60286	1.08961	2.76047
49	0.24867	0.39318	0.49734	0.60911	1.10090	2.78908
50	0.25119	0.39717	0.50239	0.61529	1.11208	2.81739
51	0.25369	0.40112	0.50738	0.62142	1.12314	2.84543
52	0.25617	0.40504	0.51233	0.62748	1.13410	2.87319
53	0.25862	0.40891	0.51724	0.63348	1.14495	2.90068
54	0.26105	0.41275	0.52209	0.63943	1.15570	2.92792
55	0.26345	0.41656	0.52691	0.64533	1.16636	2.95491
56	0.26584	0.42033	0.53167	0.65117	1.17691	2.98165

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN. m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
57	0.26820	0.42406	0.53640	0.65695	1.187373	.00815
58	0.27054	0.42777	0.54109	0.66269	1.19774	3.03442
59	0.27287	0.43144	0.54573	0.66838	1.20802	3.06047
60	0.27517	0.43508	0.55034	0.67402	1.21822	3.08630
61	0.27745	0.43869	0.55490	0.67961	1.22833	3.11191
62	0.27972	0.44227	0.55943	0.68516	1.23836	3.13731
63	0.28196	0.44582	0.56393	0.69067	1.24830	3.16251
64	0.28419	0.44935	0.56838	0.69613	1.25817	3.18751
65	0.28640	0.45284	0.57281	0.70154	1.26796	3.21232
66	0.28860	0.45631	0.57720	0.70692	1.27768	3.23694
67	0.29078	0.45976	0.58155	0.71225	1.28732	3.26137
68	0.29294	0.46318	0.58588	0.71755	1.29689	3.28561
69	0.29508	0.46657	0.59017	0.72281	1.30639	3.30969
70	0.29722	0.46994	0.59443	0.72803	1.31583	3.33358
71	0.29933	0.47328	0.59866	0.73321	1.32519	3.35731
72	0.30143	0.47660	0.60286	0.73835	1.33449	3.38087
73	0.30352	0.47990	0.60703	0.74346	1.34373	3.40427
74	0.30559	0.48318	0.61118	0.74854	1.35290	3.42750
75	0.30765	0.48643	0.61529	0.75358	1.36201	3.45059
76	0.30969	0.48966	0.61938	0.75859	1.37106	3.47351
77	0.31172	0.49288	0.62344	0.76356	1.38005	3.49629
78	0.31374	0.49607	0.62748	0.76850	1.38898	3.51892
79	0.31574	0.49924	0.63149	0.77341	1.39786	3.54141
80	0.31774	0.50239	0.63547	0.77829	1.40668	3.56375
81	0.31972	0.50552	0.63943	0.78314	1.41544	3.58595
82	0.32168	0.50863	0.64337	0.78796	1.42415	3.60802
83	0.32364	0.51172	0.64728	0.79275	1.43281	3.62995
84	0.32558	0.51479	0.65117	0.79751	1.44142	3.65176
85	0.32752	0.51785	0.65503	0.80224	1.44997	3.67343
86	0.32944	0.52088	0.65887	0.80695	1.45848	3.69497
87	0.33135	0.52390	0.66269	0.81163	1.46693	3.71639
88	0.33324	0.52691	0.66649	0.81628	1.47534	3.73769
89	0.33513	0.52989	0.67027	0.82090	1.48370	3.75887
90	0.33701	0.53286	0.67402	0.82550	1.49201	3.77993
91	0.33888	0.53581	0.67775	0.83008	1.50027	3.80087
92	0.34073	0.53875	0.68147	0.83463	1.50849	3.82170
93	0.34258	0.54167	0.68516	0.83915	1.51667	3.84241
94	0.34442	0.54457	0.68884	0.84365	1.52480	3.86301
95	0.34625	0.54746	0.69249	0.84812	1.53289	3.88351
96	0.34806	0.55034	0.69613	0.85258	1.54094	3.90389
97	0.34987	0.55319	0.69974	0.85700	1.54894	3.92417
98	0.35167	0.55604	0.70334	0.86141	1.55691	3.94435
99	0.35346	0.55887	0.70692	0.86580	1.56483	3.96442
100	0.35524	0.56168	0.71048	0.87016	1.57271	3.98439
101	0.35701	0.56449	0.71402	0.87450	1.58056	4.00427
102	0.35877	0.56727	0.71755	0.87882	1.58836	4.02404
103	0.36053	0.57005	0.72106	0.88311	1.59613	4.04372

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
104	0.36228	0.57281	0.72455	0.88739	1.60386	4.06330
105	0.36401	0.57555	0.72803	0.89165	1.61155	4.08279
106	0.36574	0.57829	0.73148	0.89588	1.61921	4.10218
107	0.36746	0.58101	0.73493	0.90010	1.62683	4.12149
108	0.36918	0.58372	0.73835	0.90429	1.63441	4.14070
109	0.37088	0.58642	0.74176	0.90847	1.64196	4.15983
110	0.37258	0.58910	0.74516	0.91263	1.64948	4.17887
111	0.37427	0.59177	0.74854	0.91677	1.65696	4.19782
112	0.37595	0.59443	0.75190	0.92089	1.66440	4.21669
113	0.37763	0.59708	0.75525	0.92499	1.67182	4.23547
114	0.37929	0.59971	0.75859	0.92907	1.67920	4.25417
115	0.38095	0.60234	0.76190	0.93314	1.68655	4.27279
116	0.38261	0.60495	0.76521	0.93719	1.69387	4.29132
117	0.38425	0.60755	0.76850	0.94122	1.70115	4.30978
118	0.38589	0.61014	0.77178	0.94523	1.70841	4.32816
119	0.38752	0.61272	0.77504	0.94923	1.71563	4.34646
120	0.38915	0.61529	0.77829	0.95321	1.72282	4.36468
121	0.39076	0.61785	0.78153	0.95717	1.72999	4.38283
122	0.39238	0.62040	0.78475	0.96112	1.73712	4.40091
123	0.39398	0.62294	0.78796	0.96505	1.74422	4.41891
124	0.39558	0.62546	0.79116	0.96897	1.75130	4.43683
125	0.39717	0.62798	0.79434	0.97286	1.75835	4.45469
126	0.39876	0.63049	0.79751	0.97675	1.76537	4.47247
127	0.40034	0.63299	0.80067	0.98062	1.77236	4.49018
128	0.40191	0.63547	0.80382	0.98447	1.77932	4.50783
129	0.40348	0.63795	0.80695	0.98831	1.78626	4.52540
130	0.40504	0.64042	0.81007	0.99213	1.79317	4.54291
131	0.40659	0.64288	0.81318	0.99594	1.80005	4.56035
132	0.40814	0.64533	0.81628	0.99973	1.80691	4.57772
133	0.40968	0.64777	0.81937	1.00351	1.81374	4.59503
134	0.41122	0.65020	0.82244	1.00728	1.82055	4.61227
135	0.41275	0.65262	0.82550	1.01103	1.82733	4.62945
136	0.41428	0.65503	0.82855	1.01477	1.83408	4.64656
137	0.41580	0.65743	0.83160	1.01849	1.84082	4.66361
138	0.41731	0.65983	0.83463	1.02220	1.84752	4.68060
139	0.41882	0.66222	0.83764	1.02590	1.85420	4.69753
140	0.42033	0.66459	0.84065	1.02958	1.86086	4.71440
141	0.42182	0.66696	0.84365	1.03325	1.86750	4.73120
142	0.42332	0.66932	0.84663	1.03691	1.87411	4.74795
143	0.42481	0.67168	0.84961	1.04056	1.88069	4.76464
144	0.42629	0.67402	0.85258	1.04419	1.88726	4.78127
145	0.42777	0.67636	0.85553	1.04781	1.89380	4.79784
146	0.42924	0.67869	0.85848	1.05141	1.90032	4.81436
147	0.43071	0.68101	0.86141	1.05501	1.90682	4.83082
148	0.43217	0.68332	0.86434	1.05859	1.91329	4.84722
149	0.43363	0.68562	0.86725	1.06216	1.91974	4.86357
150	0.43508	0.68792	0.87016	1.06572	1.92617	4.87987

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
151	0.43653	0.69021	0.87305	1.06927	1.93258	4.89610
152	0.43797	0.69249	0.87594	1.07280	1.93897	4.91229
153	0.43941	0.69476	0.87882	1.07632	1.94534	4.92842
154	0.44084	0.69703	0.88168	1.07984	1.95169	4.94450
155	0.44227	0.69929	0.88454	1.08334	1.95801	4.96053
156	0.44369	0.70154	0.88739	1.08683	1.96432	4.97651
157	0.44511	0.70379	0.89023	1.09030	1.97061	4.99243
158	0.44653	0.70603	0.89306	1.09377	1.97687	5.00830
159	0.44794	0.70826	0.89588	1.09723	1.98312	5.02413
160	0.44935	0.71048	0.89869	1.10067	1.98934	5.03990
161	0.45075	0.71270	0.90150	1.10411	1.99555	5.05563
162	0.45215	0.71491	0.90429	1.10753	2.00174	5.07130
163	0.45354	0.71711	0.90708	1.11094	2.00791	5.08693
164	0.45493	0.71931	0.90986	1.11434	2.01406	5.10251
165	0.45631	0.72150	0.91263	1.11774	2.02019	5.11805
166	0.45769	0.72368	0.91539	1.12112	2.02630	5.13353
167	0.45907	0.72586	0.91814	1.12449	2.03240	5.14897
168	0.46044	0.72803	0.92089	1.12785	2.03847	5.16436
169	0.46181	0.73019	0.92362	1.13120	2.04453	5.17971
170	0.46318	0.73235	0.92635	1.13455	2.05057	5.19501
171	0.46454	0.73450	0.92907	1.13788	2.05659	5.21027
172	0.46589	0.73664	0.93179	1.14120	2.06260	5.22548
173	0.46725	0.73878	0.93449	1.14451	2.06858	5.24065
174	0.46859	0.74091	0.93719	1.14782	2.07455	5.25578
175	0.46994	0.74304	0.93988	1.15111	2.08051	5.27086
176	0.47128	0.74516	0.94256	1.15439	2.08644	5.28589
177	0.47262	0.74727	0.94523	1.15767	2.09236	5.30089
178	0.47395	0.74938	0.94790	1.16093	2.09826	5.31584
179	0.47528	0.75148	0.95056	1.16419	2.10415	5.33075
180	0.47660	0.75358	0.95321	1.16744	2.11002	5.34562
181	0.47793	0.75567	0.95585	1.17068	2.11587	5.36045
182	0.47924	0.75775	0.95849	1.17391	2.12171	5.37524
183	0.48056	0.75983	0.96112	1.17713	2.12753	5.38999
184	0.48187	0.76190	0.96374	1.18034	2.13333	5.40469
185	0.48318	0.76397	0.96636	1.18354	2.13912	5.41936
186	0.48448	0.76603	0.96897	1.18674	2.14490	5.43399
187	0.48578	0.76809	0.97157	1.18992	2.15065	5.44858
188	0.48708	0.77014	0.97416	1.19310	2.15640	5.46312
189	0.48837	0.77219	0.97675	1.19627	2.16213	5.47763
190	0.48966	0.77423	0.97933	1.19943	2.16784	5.49211
191	0.49095	0.77626	0.98190	1.20258	2.17353	5.50654
192	0.49223	0.77829	0.98447	1.20572	2.17922	5.52094
193	0.49352	0.78032	0.98703	1.20886	2.18488	5.53530
194	0.49479	0.78233	0.98958	1.21199	2.19054	5.54962
195	0.49607	0.78435	0.99213	1.21511	2.19618	5.56390
196	0.49734	0.78636	0.99467	1.21822	2.20180	5.57815
197	0.49860	0.78836	0.99721	1.22132	2.20741	5.59236

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
198	0.49987	0.79036	0.99973	1.22442	2.21301	5.60654
199	0.50113	0.79235	1.00226	1.22751	2.21859	5.62068
200	0.50239	0.79434	1.00477	1.23059	2.22415	5.63478
201	0.50364	0.79632	1.00728	1.23366	2.22971	5.64885
202	0.50489	0.79830	1.00978	1.23673	2.23525	5.66289
203	0.50614	0.80028	1.01228	1.23978	2.24077	5.67689
204	0.50738	0.80224	1.01477	1.24283	2.24629	5.69085
205	0.50863	0.80421	1.01725	1.24587	2.25178	5.70478
206	0.50987	0.80617	1.01973	1.24891	2.25727	5.71868
207	0.51110	0.80812	1.02220	1.25194	2.26274	5.73254
208	0.51233	0.81007	1.02467	1.25496	2.26820	5.74637
209	0.51356	0.81202	1.02713	1.25797	2.27365	5.76017
210	0.51479	0.81396	1.02958	1.26098	2.27908	5.77393
211	0.51602	0.81589	1.03203	1.26398	2.28450	5.78767
212	0.51724	0.81782	1.03447	1.26697	2.28991	5.80136
213	0.51846	0.81975	1.03691	1.26995	2.29530	5.81503
214	0.51967	0.82167	1.03934	1.27293	2.30068	5.82866
215	0.52088	0.82359	1.04177	1.27590	2.30605	5.84227
216	0.52209	0.82550	1.04419	1.27886	2.31141	5.85584
217	0.52330	0.82741	1.04660	1.28182	2.31675	5.86938
218	0.52451	0.82932	1.04901	1.28477	2.32209	5.88289
219	0.52571	0.83122	1.05141	1.28771	2.32740	5.89636
220	0.52691	0.83311	1.05381	1.29065	2.33271	5.90981
221	0.52810	0.83500	1.05620	1.29358	2.33801	5.92323
222	0.52930	0.83689	1.05859	1.29650	2.34329	5.93661
223	0.53049	0.83877	1.06097	1.29942	2.34856	5.94997
224	0.53167	0.84065	1.06335	1.30233	2.35382	5.96329
225	0.53286	0.84253	1.06572	1.30524	2.35907	5.97659
226	0.53404	0.84440	1.06809	1.30813	2.36431	5.98986
227	0.53522	0.84626	1.07045	1.31102	2.36953	6.00309
228	0.53640	0.84812	1.07280	1.31391	2.37475	6.01630
229	0.53758	0.84998	1.07515	1.31679	2.37995	6.02948
230	0.53875	0.85184	1.07750	1.31966	2.38514	6.04263
231	0.53992	0.85369	1.07984	1.32252	2.39032	6.05575
232	0.54109	0.85553	1.08217	1.32538	2.39549	6.06885
233	0.54225	0.85737	1.08450	1.32824	2.40064	6.08191
234	0.54341	0.85921	1.08683	1.33108	2.40579	6.09495
235	0.54457	0.86104	1.08915	1.33393	2.41093	6.10796
236	0.54573	0.86287	1.09146	1.33676	2.41605	6.12094
237	0.54689	0.86470	1.09377	1.33959	2.42116	6.13390
238	0.54804	0.86652	1.09608	1.34241	2.42627	6.14682
239	0.54919	0.86834	1.09838	1.34523	2.43136	6.15972
240	0.55034	0.87016	1.10067	1.34804	2.43644	6.17260
241	0.55148	0.87197	1.10296	1.35085	2.44151	6.18544
242	0.55262	0.87377	1.10525	1.35365	2.44657	6.19826
243	0.55376	0.87558	1.10753	1.35644	2.45162	6.21105
244	0.55490	0.87738	1.10981	1.35923	2.45666	6.22382

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
245	0.55604	0.87917	1.11208	1.36201	2.46169	6.23656
246	0.55717	0.88097	1.11434	1.36479	2.46671	6.24928
247	0.55830	0.88276	1.11661	1.36756	2.47171	6.26197
248	0.55943	0.88454	1.11887	1.37032	2.47671	6.27463
249	0.56056	0.88632	1.12112	1.37308	2.48170	6.28727
250	0.56168	0.88810	1.12337	1.37584	2.48668	6.29988
251	0.56281	0.88987	1.12561	1.37859	2.49165	6.31247
252	0.56393	0.89165	1.12785	1.38133	2.49661	6.32503
253	0.56504	0.89341	1.13009	1.38407	2.50156	6.33757
254	0.56616	0.89518	1.13232	1.38680	2.50649	6.35008
255	0.56727	0.89694	1.13455	1.38953	2.51142	6.36257
256	0.56838	0.89869	1.13677	1.39225	2.51634	6.37503
257	0.56949	0.90045	1.13899	1.39497	2.52125	6.38747
258	0.57060	0.90220	1.14120	1.39768	2.52615	6.39988
259	0.57170	0.90394	1.14341	1.40038	2.53104	6.41227
260	0.57281	0.90569	1.14561	1.40309	2.53593	6.42464
261	0.57391	0.90743	1.14782	1.40578	2.54080	6.43698
262	0.57501	0.90916	1.15001	1.40847	2.54566	6.44930
263	0.57610	0.91090	1.15220	1.41116	2.55051	6.46160
264	0.57720	0.91263	1.15439	1.41384	2.55536	6.47387
265	0.57829	0.91435	1.15658	1.41651	2.56019	6.48612
266	0.57938	0.91608	1.15876	1.41918	2.56502	6.49835
267	0.58047	0.91780	1.16093	1.42185	2.56984	6.51055
268	0.58155	0.91952	1.16311	1.42451	2.57464	6.52273
269	0.58264	0.92123	1.16527	1.42716	2.57944	6.53489
270	0.58372	0.92294	1.16744	1.42981	2.58423	6.54703
271	0.58480	0.92465	1.16960	1.43246	2.58901	6.55914
272	0.58588	0.92635	1.17175	1.43510	2.59379	6.57123
273	0.58695	0.92805	1.17391	1.43773	2.59855	6.58330
274	0.58803	0.92975	1.17605	1.44037	2.60331	6.59534
275	0.58910	0.93145	1.17820	1.44299	2.60805	6.60737
276	0.59017	0.93314	1.18034	1.44561	2.61279	6.61937
277	0.59124	0.93483	1.18247	1.44823	2.61752	6.63135
278	0.59230	0.93651	1.18461	1.45084	2.62224	6.64331
279	0.59337	0.93820	1.18674	1.45345	2.62695	6.65525
280	0.59443	0.93988	1.18886	1.45605	2.63165	6.66716
281	0.59549	0.94155	1.19098	1.45865	2.63635	6.67906
282	0.59655	0.94323	1.19310	1.46124	2.64104	6.69093
283	0.59761	0.94490	1.19521	1.46383	2.64572	6.70279
284	0.59866	0.94657	1.19732	1.46641	2.65039	6.71462
285	0.59971	0.94823	1.19943	1.46899	2.65505	6.72643
286	0.60077	0.94989	1.20153	1.47157	2.65970	6.73822
287	0.60181	0.95155	1.20363	1.47414	2.66435	6.74999
288	0.60286	0.95321	1.20572	1.47670	2.66899	6.76174
289	0.60391	0.95486	1.20782	1.47927	2.67361	6.77347
290	0.60495	0.95651	1.20990	1.48182	2.67824	6.78518
291	0.60599	0.95816	1.21199	1.48438	2.68285	6.79687

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS

VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
292	0.60703	0.95981	1.21407	1.48692	2.68746	6.80853
293	0.60807	0.96145	1.21615	1.48947	2.69205	6.82018
294	0.60911	0.96309	1.21822	1.49201	2.69664	6.83181
295	0.61014	0.96472	1.22029	1.49454	2.70123	6.84342
296	0.61118	0.96636	1.22236	1.49707	2.70580	6.85501
297	0.61221	0.96799	1.22442	1.49960	2.71037	6.86658
298	0.61324	0.96962	1.22648	1.50212	2.71493	6.87813
299	0.61427	0.97124	1.22853	1.50464	2.71948	6.88966
300	0.61529	0.97286	1.23059	1.50716	2.72402	6.90117
301	0.61632	0.97448	1.23264	1.50967	2.72856	6.91266
302	0.61734	0.97610	1.23468	1.51217	2.73309	6.92414
303	0.61836	0.97772	1.23673	1.51467	2.73761	6.93559
304	0.61938	0.97933	1.23876	1.51717	2.74212	6.94703
305	0.62040	0.98094	1.24080	1.51966	2.74663	6.95844
306	0.62142	0.98255	1.24283	1.52215	2.75113	6.96984
307	0.62243	0.98415	1.24486	1.52464	2.75562	6.98122
308	0.62344	0.98575	1.24689	1.52712	2.76010	6.99258
309	0.62445	0.98735	1.24891	1.52960	2.76458	7.00392
310	0.62546	0.98895	1.25093	1.53207	2.76905	7.01525
311	0.62647	0.99054	1.25295	1.53454	2.77351	7.02655
312	0.62748	0.99213	1.25496	1.53700	2.77797	7.03784
313	0.62848	0.99372	1.25697	1.53946	2.78242	7.04911
314	0.62949	0.99531	1.25897	1.54192	2.78686	7.06036
315	0.63049	0.99689	1.26098	1.54438	2.79129	7.07160
316	0.63149	0.99847	1.26298	1.54682	2.79572	7.08281
317	0.63249	1.00005	1.26497	1.54927	2.80014	7.09401
318	0.63348	1.00163	1.26697	1.55171	2.80455	7.10519
319	0.63448	1.00320	1.26896	1.55415	2.80896	7.11635
320	0.63547	1.00477	1.27095	1.55658	2.81336	7.12750
321	0.63646	1.00634	1.27293	1.55901	2.81775	7.13863
322	0.63746	1.00791	1.27491	1.56144	2.82214	7.14974
323	0.63844	1.00947	1.27689	1.56386	2.82651	7.16083
324	0.63943	1.01103	1.27886	1.56628	2.83089	7.17191
325	0.64042	1.01259	1.28084	1.56870	2.83525	7.18297
326	0.64140	1.01415	1.28281	1.57111	2.83961	7.19401
327	0.64239	1.01570	1.28477	1.57352	2.84396	7.20503
328	0.64337	1.01725	1.28673	1.57592	2.84831	7.21604
329	0.64435	1.01880	1.28869	1.57832	2.85265	7.22703
330	0.64533	1.02035	1.29065	1.58072	2.85698	7.23801
331	0.64630	1.02189	1.29261	1.58311	2.86130	7.24897
332	0.64728	1.02344	1.29456	1.58550	2.86562	7.25991
333	0.64825	1.02498	1.29650	1.58789	2.86993	7.27084
334	0.64922	1.02651	1.29845	1.59027	2.87424	7.28174
335	0.65020	1.02805	1.30039	1.59265	2.87854	7.29264
336	0.65117	1.02958	1.30233	1.59502	2.88283	7.30351
337	0.65213	1.03111	1.30427	1.59740	2.88712	7.31437
338	0.65310	1.03264	1.30620	1.59976	2.89140	7.32522

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
339	0.65407	1.03417	1.30813	1.60213	2.89567	7.33605
340	0.65503	1.03569	1.31006	1.60449	2.89994	7.34686
341	0.65599	1.03722	1.31199	1.60685	2.90420	7.35765
342	0.65695	1.03874	1.31391	1.60920	2.90846	7.36843
343	0.65791	1.04025	1.31583	1.61155	2.91271	7.37920
344	0.65887	1.04177	1.31774	1.61390	2.91695	7.38995
345	0.65983	1.04328	1.31966	1.61624	2.92119	7.40068
346	0.66078	1.04479	1.32157	1.61859	2.92542	7.41140
347	0.66174	1.04630	1.32348	1.62092	2.92964	7.42210
348	0.66269	1.04781	1.32538	1.62326	2.93386	7.43279
349	0.66364	1.04931	1.32729	1.62559	2.93807	7.44346
350	0.66459	1.05081	1.32919	1.62791	2.94228	7.45412
351	0.66554	1.05231	1.33108	1.63024	2.94648	7.46476
352	0.66649	1.05381	1.33298	1.63256	2.95067	7.47538
353	0.66744	1.05531	1.33487	1.63488	2.95486	7.48600
354	0.66838	1.05680	1.33676	1.63719	2.95904	7.49659
355	0.66932	1.05829	1.33865	1.63950	2.96322	7.50717
356	0.67027	1.05978	1.34053	1.64181	2.96739	7.51774
357	0.67121	1.06127	1.34241	1.64411	2.97156	7.52829
358	0.67215	1.06276	1.34429	1.64641	2.97572	7.53883
359	0.67308	1.06424	1.34617	1.64871	2.97987	7.54935
360	0.67402	1.06572	1.34804	1.65101	2.98402	7.55985
361	0.67496	1.06720	1.34991	1.65330	2.98816	7.57035
362	0.67589	1.06868	1.35178	1.65559	2.99229	7.58082
363	0.67682	1.07015	1.35365	1.65787	2.99642	7.59129
364	0.67775	1.07162	1.35551	1.66015	3.00055	7.60174
365	0.67869	1.07310	1.35737	1.66243	3.00467	7.61217
366	0.67961	1.07456	1.35923	1.66471	3.00878	7.62259
367	0.68054	1.07603	1.36108	1.66698	3.01289	7.63300
368	0.68147	1.07750	1.36294	1.66925	3.01699	7.64339
369	0.68239	1.07896	1.36479	1.67152	3.02109	7.65377
370	0.68332	1.08042	1.36664	1.67378	3.02518	7.66413
371	0.68424	1.08188	1.36848	1.67604	3.02926	7.67448
372	0.68516	1.08334	1.37032	1.67830	3.03334	7.68482
373	0.68608	1.08479	1.37216	1.68055	3.03742	7.69514
374	0.68700	1.08624	1.37400	1.68280	3.04149	7.70545
375	0.68792	1.08770	1.37584	1.68505	3.04555	7.71574
376	0.68884	1.08915	1.37767	1.68730	3.04961	7.72602
377	0.68975	1.09059	1.37950	1.68954	3.05366	7.73629
378	0.69067	1.09204	1.38133	1.69178	3.05771	7.74655
379	0.69158	1.09348	1.38316	1.69401	3.06175	7.75679
380	0.69249	1.09492	1.38498	1.69625	3.06579	7.76701
381	0.69340	1.09636	1.38680	1.69848	3.06982	7.77723
382	0.69431	1.09780	1.38862	1.70071	3.07384	7.78742
383	0.69522	1.09924	1.39044	1.70293	3.07786	7.79761
384	0.69613	1.10067	1.39225	1.70515	3.08188	7.80778
385	0.69703	1.10210	1.39406	1.70737	3.08589	7.81794

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
386	0.69794	1.10353	1.39587	1.70959	3.08989	7.82809
387	0.69884	1.10496	1.39768	1.71180	3.09389	7.83822
388	0.69974	1.10639	1.39948	1.71401	3.09789	7.84834
389	0.70064	1.10781	1.40129	1.71622	3.10188	7.85845
390	0.70154	1.10924	1.40309	1.71842	3.10586	7.86855
391	0.70244	1.11066	1.40488	1.72062	3.10984	7.87863
392	0.70334	1.11208	1.40668	1.72282	3.11382	7.88870
393	0.70424	1.11349	1.40847	1.72502	3.11779	7.89875
394	0.70513	1.11491	1.41026	1.72721	3.12175	7.90879
395	0.70603	1.11633	1.41205	1.72940	3.12571	7.91882
396	0.70692	1.11774	1.41384	1.73159	3.12966	7.92884
397	0.70781	1.11915	1.41562	1.73378	3.13361	7.93885
398	0.70870	1.12056	1.41740	1.73596	3.13756	7.94884
399	0.70959	1.12196	1.41918	1.73814	3.14149	7.95882
400	0.71048	1.12337	1.42096	1.74031	3.14543	7.96879
401	0.71137	1.12477	1.42274	1.74249	3.14936	7.97874
402	0.71225	1.12617	1.42451	1.74466	3.15328	7.98868
403	0.71314	1.12757	1.42628	1.74683	3.15720	7.99861
404	0.71402	1.12897	1.42805	1.74899	3.16112	8.00853
405	0.71491	1.13037	1.42981	1.75116	3.16503	8.01844
406	0.71579	1.13176	1.43158	1.75332	3.16893	8.02833
407	0.71667	1.13315	1.43334	1.75548	3.17283	8.03821
408	0.71755	1.13455	1.43510	1.75763	3.17673	8.04808
409	0.71843	1.13594	1.43686	1.75978	3.18062	8.05794
410	0.71931	1.13732	1.43861	1.76193	3.18450	8.06778
411	0.72018	1.13871	1.44037	1.76408	3.18839	8.07761
412	0.72106	1.14009	1.44212	1.76623	3.19226	8.08743
413	0.72193	1.14148	1.44387	1.76837	3.19613	8.09724
414	0.72281	1.14286	1.44561	1.77051	3.20000	8.10704
415	0.72368	1.14424	1.44736	1.77264	3.20386	8.11683
416	0.72455	1.14561	1.44910	1.77478	3.20772	8.12660
417	0.72542	1.14699	1.45084	1.77691	3.21157	8.13636
418	0.72629	1.14837	1.45258	1.77904	3.21542	8.14611
419	0.72716	1.14974	1.45432	1.78117	3.21927	8.15585
420	0.72803	1.15111	1.45605	1.78329	3.22311	8.16558
421	0.72889	1.15248	1.45778	1.78541	3.22694	8.17529
422	0.72976	1.15385	1.45951	1.78753	3.23077	8.18499
423	0.73062	1.15521	1.46124	1.78965	3.23460	8.19469
424	0.73148	1.15658	1.46297	1.79176	3.23842	8.20437
425	0.73235	1.15794	1.46469	1.79387	3.24223	8.21404
426	0.73321	1.15930	1.46641	1.79598	3.24605	8.22369
427	0.73407	1.16066	1.46813	1.79809	3.24985	8.23334
428	0.73493	1.16202	1.46985	1.80019	3.25366	8.24298
429	0.73578	1.16338	1.47157	1.80230	3.25746	8.25260
430	0.73664	1.16473	1.47328	1.80440	3.26125	8.26221
431	0.73750	1.16609	1.47499	1.80649	3.26504	8.27182
432	0.73835	1.16744	1.47670	1.80859	3.26883	8.28141

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
433	0.73921	1.16879	1.47841	1.81068	3.27261	8.29099
434	0.74006	1.17014	1.48012	1.81277	3.27638	8.30055
435	0.74091	1.17148	1.48182	1.81486	3.28016	8.31011
436	0.74176	1.17283	1.48353	1.81694	3.28392	8.31966
437	0.74261	1.17417	1.48523	1.81902	3.28769	8.32919
438	0.74346	1.17552	1.48692	1.82110	3.29145	8.33872
439	0.74431	1.17686	1.48862	1.82318	3.29520	8.34823
440	0.74516	1.17820	1.49032	1.82526	3.29895	8.35773
441	0.74600	1.17954	1.49201	1.82733	3.30270	8.36723
442	0.74685	1.18087	1.49370	1.82940	3.30644	8.37671
443	0.74769	1.18221	1.49539	1.83147	3.31018	8.38618
444	0.74854	1.18354	1.49707	1.83353	3.31392	8.39564
445	0.74938	1.18487	1.49876	1.83560	3.31764	8.40509
446	0.75022	1.18620	1.50044	1.83766	3.32137	8.41453
447	0.75106	1.18753	1.50212	1.83972	3.32509	8.42395
448	0.75190	1.18886	1.50380	1.84177	3.32881	8.43337
449	0.75274	1.19019	1.50548	1.84383	3.33252	8.44278
450	0.75358	1.19151	1.50716	1.84588	3.33623	8.45217
451	0.75441	1.19283	1.50883	1.84793	3.33994	8.46156
452	0.75525	1.19416	1.51050	1.84998	3.34364	8.47094
453	0.75609	1.19548	1.51217	1.85202	3.34733	8.48030
454	0.75692	1.19680	1.51384	1.85407	3.35103	8.48966
455	0.75775	1.19811	1.51551	1.85611	3.35471	8.49900
456	0.75859	1.19943	1.51717	1.85815	3.35840	8.50834
457	0.75942	1.20074	1.51883	1.86018	3.36208	8.51766
458	0.76025	1.20206	1.52049	1.86222	3.36576	8.52697
459	0.76108	1.20337	1.52215	1.86425	3.36943	8.53628
460	0.76190	1.20468	1.52381	1.86628	3.37310	8.54557
461	0.76273	1.20599	1.52547	1.86831	3.37676	8.55485
462	0.76356	1.20729	1.52712	1.87033	3.38042	8.56413
463	0.76439	1.20860	1.52877	1.87235	3.38408	8.57339
464	0.76521	1.20990	1.53042	1.87437	3.38773	8.58265
465	0.76603	1.21121	1.53207	1.87639	3.39138	8.59189
466	0.76686	1.21251	1.53372	1.87841	3.39502	8.60112
467	0.76768	1.21381	1.53536	1.88042	3.39866	8.61035
468	0.76850	1.21511	1.53700	1.88244	3.40230	8.61956
469	0.76932	1.21641	1.53864	1.88445	3.40593	8.62876
470	0.77014	1.21770	1.54028	1.88645	3.40956	8.63796
471	0.77096	1.21900	1.54192	1.88846	3.41319	8.64714
472	0.77178	1.22029	1.54356	1.89046	3.41681	8.65632
473	0.77260	1.22158	1.54519	1.89247	3.42043	8.66548
474	0.77341	1.22287	1.54682	1.89447	3.42404	8.67464
475	0.77423	1.22416	1.54846	1.89646	3.42765	8.68378
476	0.77504	1.22545	1.55008	1.89846	3.43126	8.69292
477	0.77586	1.22674	1.55171	1.90045	3.43486	8.70205
478	0.77667	1.22802	1.55334	1.90244	3.43846	8.71116
479	0.77748	1.22930	1.55496	1.90443	3.44205	8.72027

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
480	0.77829	1.23059	1.55658	1.90642	3.44564	8.72937
481	0.77910	1.23187	1.55820	1.90840	3.44923	8.73846
482	0.77991	1.23315	1.55982	1.91039	3.45282	8.74754
483	0.78072	1.23443	1.56144	1.91237	3.45640	8.75660
484	0.78153	1.23570	1.56306	1.91434	3.45997	8.76566
485	0.78233	1.23698	1.56467	1.91632	3.46354	8.77472
486	0.78314	1.23825	1.56628	1.91830	3.46711	8.78376
487	0.78395	1.23953	1.56789	1.92027	3.47068	8.79279
488	0.78475	1.24080	1.56950	1.92224	3.47424	8.80181
489	0.78555	1.24207	1.57111	1.92421	3.47780	8.81083
490	0.78636	1.24334	1.57271	1.92617	3.48135	8.81983
491	0.78716	1.24461	1.57432	1.92814	3.48490	8.82883
492	0.78796	1.24587	1.57592	1.93010	3.48845	8.83781
493	0.78876	1.24714	1.57752	1.93206	3.49199	8.84679
494	0.78956	1.24840	1.57912	1.93402	3.49553	8.85576
495	0.79036	1.24967	1.58072	1.93598	3.49907	8.86472
496	0.79116	1.25093	1.58231	1.93793	3.50260	8.87366
497	0.79195	1.25219	1.58391	1.93988	3.50613	8.88261
498	0.79275	1.25345	1.58550	1.94183	3.50966	8.89154
499	0.79355	1.25471	1.58709	1.94378	3.51318	8.90046
500	0.79434	1.25596	1.58868	1.94573	3.51670	8.90937
501	0.79513	1.25722	1.59027	1.94767	3.52021	8.91828
502	0.79593	1.25847	1.59186	1.94962	3.52372	8.92717
503	0.79672	1.25973	1.59344	1.95156	3.52723	8.93606
504	0.79751	1.26098	1.59502	1.95350	3.53074	8.94494
505	0.79830	1.26223	1.59661	1.95543	3.53424	8.95381
506	0.79909	1.26348	1.59819	1.95737	3.53773	8.96267
507	0.79988	1.26472	1.59976	1.95930	3.54123	8.97152
508	0.80067	1.26597	1.60134	1.96123	3.54472	8.98037
509	0.80146	1.26722	1.60292	1.96316	3.54821	8.98920
510	0.80224	1.26846	1.60449	1.96509	3.55169	8.99803
511	0.80303	1.26970	1.60606	1.96702	3.55517	9.00684
512	0.80382	1.27095	1.60763	1.96894	3.55865	9.01565
513	0.80460	1.27219	1.60920	1.97086	3.56212	9.02445
514	0.80538	1.27343	1.61077	1.97278	3.56559	9.03324
515	0.80617	1.27466	1.61234	1.97470	3.56906	9.04203
516	0.80695	1.27590	1.61390	1.97662	3.57252	9.05080
517	0.80773	1.27714	1.61546	1.97853	3.57598	9.05957
518	0.80851	1.27837	1.61703	1.98044	3.57944	9.06832
519	0.80929	1.27960	1.61859	1.98235	3.58289	9.07707
520	0.81007	1.28084	1.62014	1.98426	3.58634	9.08581
521	0.81085	1.28207	1.62170	1.98617	3.58979	9.09455
522	0.81163	1.28330	1.62326	1.98807	3.59323	9.10327
523	0.81241	1.28453	1.62481	1.98998	3.59667	9.11199
524	0.81318	1.28575	1.62636	1.99188	3.60011	9.12069
525	0.81396	1.28698	1.62791	1.99378	3.60354	9.12939
526	0.81473	1.28820	1.62946	1.99568	3.60697	9.13808

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
527	0.81551	1.28943	1.63101	1.99757	3.61040	9.14676
528	0.81628	1.29065	1.63256	1.99947	3.61382	9.15544
529	0.81705	1.29187	1.63410	2.00136	3.61724	9.16410
530	0.81782	1.29309	1.63565	2.00325	3.62066	9.17276
531	0.81860	1.29431	1.63719	2.00514	3.62407	9.18141
532	0.81937	1.29553	1.63873	2.00703	3.62749	9.19005
533	0.82014	1.29675	1.64027	2.00891	3.63089	9.19869
534	0.82090	1.29796	1.64181	2.01080	3.63430	9.20731
535	0.82167	1.29918	1.64335	2.01268	3.63770	9.21593
536	0.82244	1.30039	1.64488	2.01456	3.64110	9.22454
537	0.82321	1.30160	1.64641	2.01644	3.64449	9.23314
538	0.82397	1.30282	1.64795	2.01831	3.64788	9.24173
539	0.82474	1.30403	1.64948	2.02019	3.65127	9.25032
540	0.82550	1.30524	1.65101	2.02206	3.65466	9.25889
541	0.82627	1.30644	1.65253	2.02393	3.65804	9.26746
542	0.82703	1.30765	1.65406	2.02580	3.66142	9.27602
543	0.82779	1.30886	1.65559	2.02767	3.66480	9.28458
544	0.82855	1.31006	1.65711	2.02954	3.66817	9.29312
545	0.82932	1.31126	1.65863	2.03140	3.67154	9.30166
546	0.83008	1.31247	1.66015	2.03326	3.67491	9.31019
547	0.83084	1.31367	1.66167	2.03513	3.67827	9.31871
548	0.83160	1.31487	1.66319	2.03698	3.68163	9.32723
549	0.83235	1.31607	1.66471	2.03884	3.68499	9.33573
550	0.83311	1.31727	1.66622	2.04070	3.68834	9.34423
551	0.83387	1.31846	1.66774	2.04255	3.69169	9.35272
552	0.83463	1.31966	1.66925	2.04441	3.69504	9.36120
553	0.83538	1.32085	1.67076	2.04626	3.69839	9.36968
554	0.83614	1.32205	1.67227	2.04811	3.70173	9.37815
555	0.83689	1.32324	1.67378	2.04995	3.70507	9.38661
556	0.83764	1.32443	1.67529	2.05180	3.70841	9.39506
557	0.83840	1.32562	1.67679	2.05364	3.71174	9.40351
558	0.83915	1.32681	1.67830	2.05549	3.71507	9.41194
559	0.83990	1.32800	1.67980	2.05733	3.71840	9.42037
560	0.84065	1.32919	1.68130	2.05917	3.72172	9.42880
561	0.84140	1.33037	1.68280	2.06100	3.72504	9.43721
562	0.84215	1.33156	1.68430	2.06284	3.72836	9.44562
563	0.84290	1.33274	1.68580	2.06467	3.73168	9.45402
564	0.84365	1.33393	1.68730	2.06651	3.73499	9.46241
565	0.84440	1.33511	1.68879	2.06834	3.73830	9.47079
566	0.84514	1.33629	1.69029	2.07017	3.74161	9.47917
567	0.84589	1.33747	1.69178	2.07200	3.74491	9.48754
568	0.84663	1.33865	1.69327	2.07382	3.74821	9.49590
569	0.84738	1.33982	1.69476	2.07565	3.75151	9.50426
570	0.84812	1.34100	1.69625	2.07747	3.75480	9.51261
571	0.84887	1.34218	1.69774	2.07929	3.75810	9.52095
572	0.84961	1.34335	1.69922	2.08111	3.76139	9.52928
573	0.85035	1.34453	1.70071	2.08293	3.76467	9.53761

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
574	0.85109	1.34570	1.70219	2.08475	3.76796	9.54593
575	0.85184	1.34687	1.70367	2.08656	3.77124	9.55424
576	0.85258	1.34804	1.70515	2.08838	3.77451	9.56254
577	0.85332	1.34921	1.70663	2.09019	3.77779	9.57084
578	0.85405	1.35038	1.70811	2.09200	3.78106	9.57913
579	0.85479	1.35155	1.70959	2.09381	3.78433	9.58741
580	0.85553	1.35271	1.71106	2.09561	3.78760	9.59569
581	0.85627	1.35388	1.71254	2.09742	3.79086	9.60396
582	0.85700	1.35504	1.71401	2.09922	3.79412	9.61222
583	0.85774	1.35621	1.71548	2.10103	3.79738	9.62047
584	0.85848	1.35737	1.71695	2.10283	3.80064	9.62872
585	0.85921	1.35853	1.71842	2.10463	3.80389	9.63696
586	0.85994	1.35969	1.71989	2.10643	3.80714	9.64519
587	0.86068	1.36085	1.72136	2.10822	3.81039	9.65342
588	0.86141	1.36201	1.72282	2.11002	3.81363	9.66164
589	0.86214	1.36317	1.72429	2.11181	3.81687	9.66985
590	0.86287	1.36433	1.72575	2.11360	3.82011	9.67806
591	0.86361	1.36548	1.72721	2.11539	3.82335	9.68626
592	0.86434	1.36664	1.72867	2.11718	3.82658	9.69445
593	0.86507	1.36779	1.73013	2.11897	3.82981	9.70263
594	0.86580	1.36894	1.73159	2.12076	3.83304	9.71081
595	0.86652	1.37009	1.73305	2.12254	3.83626	9.71898
596	0.86725	1.37124	1.73450	2.12432	3.83949	9.72714
597	0.86798	1.37239	1.73596	2.12610	3.84271	9.73530
598	0.86871	1.37354	1.73741	2.12788	3.84592	9.74345
599	0.86943	1.37469	1.73886	2.12966	3.84914	9.75159
600	0.87016	1.37584	1.74031	2.13144	3.85235	9.75973
601	0.87088	1.37698	1.74176	2.13322	3.85556	9.76786
602	0.87161	1.37813	1.74321	2.13499	3.85876	9.77598
603	0.87233	1.37927	1.74466	2.13676	3.86197	9.78410
604	0.87305	1.38042	1.74610	2.13853	3.86517	9.79221
605	0.87377	1.38156	1.74755	2.14030	3.86837	9.80031
606	0.87450	1.38270	1.74899	2.14207	3.87156	9.80841
607	0.87522	1.38384	1.75044	2.14384	3.87475	9.81650
608	0.87594	1.38498	1.75188	2.14560	3.87795	9.82458
609	0.87666	1.38612	1.75332	2.14737	3.88113	9.83266
610	0.87738	1.38726	1.75476	2.14913	3.88432	9.84073
611	0.87810	1.38839	1.75619	2.15089	3.88750	9.84879
612	0.87882	1.38953	1.75763	2.15265	3.89068	9.85684
613	0.87953	1.39066	1.75907	2.15441	3.89386	9.86489
614	0.88025	1.39180	1.76050	2.15616	3.89703	9.87294
615	0.88097	1.39293	1.76193	2.15792	3.90021	9.88097
616	0.88168	1.39406	1.76336	2.15967	3.90337	9.88900
617	0.88240	1.39519	1.76480	2.16142	3.90654	9.89703
618	0.88311	1.39632	1.76623	2.16318	3.90971	9.90504
619	0.88383	1.39745	1.76765	2.16492	3.91287	9.91305
620	0.88454	1.39858	1.76908	2.16667	3.91603	9.92106

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
621	0.88525	1.39971	1.77051	2.16842	3.91918	9.92906
622	0.88597	1.40084	1.77193	2.17016	3.92234	9.93705
623	0.88668	1.40196	1.77336	2.17191	3.92549	9.94503
624	0.88739	1.40309	1.77478	2.17365	3.92864	9.95301
625	0.88810	1.40421	1.77620	2.17539	3.93179	9.96098
626	0.88881	1.40533	1.77762	2.17713	3.93493	9.96895
627	0.88952	1.40645	1.77904	2.17887	3.93807	9.97691
628	0.89023	1.40758	1.78046	2.18061	3.94121	9.98486
629	0.89094	1.40870	1.78187	2.18234	3.94435	9.99281
630	0.89165	1.40982	1.78329	2.18408	3.94748	10.00075
631	0.89235	1.41093	1.78471	2.18581	3.95061	10.00868
632	0.89306	1.41205	1.78612	2.18754	3.95374	10.01661
633	0.89377	1.41317	1.78753	2.18927	3.95687	10.02453
634	0.89447	1.41428	1.78894	2.19100	3.95999	10.03245
635	0.89518	1.41540	1.79035	2.19273	3.96312	10.04035
636	0.89588	1.41651	1.79176	2.19445	3.96624	10.04826
637	0.89659	1.41763	1.79317	2.19618	3.96935	10.05615
638	0.89729	1.41874	1.79458	2.19790	3.97247	10.06404
639	0.89799	1.41985	1.79598	2.19962	3.97558	10.07193
640	0.89869	1.42096	1.79739	2.20134	3.97869	10.07981
641	0.89940	1.42207	1.79879	2.20306	3.98180	10.08768
642	0.90010	1.42318	1.80019	2.20478	3.98490	10.09554
643	0.90080	1.42429	1.80160	2.20650	3.98800	10.10340
644	0.90150	1.42539	1.80300	2.20821	3.99110	10.11126
645	0.90220	1.42650	1.80440	2.20992	3.99420	10.11910
646	0.90290	1.42761	1.80579	2.21164	3.99729	10.12694
647	0.90360	1.42871	1.80719	2.21335	4.00039	10.13478
648	0.90429	1.42981	1.80859	2.21506	4.00348	10.14261
649	0.90499	1.43092	1.80998	2.21677	4.00657	10.15043
650	0.90569	1.43202	1.81138	2.21847	4.00965	10.15825
651	0.90638	1.43312	1.81277	2.22018	4.01273	10.16606
652	0.90708	1.43422	1.81416	2.22188	4.01581	10.17387
653	0.90778	1.43532	1.81555	2.22359	4.01889	10.18166
654	0.90847	1.43642	1.81694	2.22529	4.02197	10.18946
655	0.90916	1.43752	1.81833	2.22699	4.02504	10.19724
656	0.90986	1.43861	1.81972	2.22869	4.02811	10.20503
657	0.91055	1.43971	1.82110	2.23039	4.03118	10.21280
658	0.91124	1.44080	1.82249	2.23208	4.03425	10.22057
659	0.91194	1.44190	1.82387	2.23378	4.03731	10.22833
660	0.91263	1.44299	1.82526	2.23547	4.04038	10.23609
661	0.91332	1.44408	1.82664	2.23717	4.04344	10.24384
662	0.91401	1.44518	1.82802	2.23886	4.04649	10.25159
663	0.91470	1.44627	1.82940	2.24055	4.04955	10.25933
664	0.91539	1.44736	1.83078	2.24224	4.05260	10.26706
665	0.91608	1.44845	1.83216	2.24392	4.05565	10.27479
666	0.91677	1.44954	1.83353	2.24561	4.05870	10.28251
667	0.91746	1.45062	1.83491	2.24730	4.06175	10.29023

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
668	0.91814	1.45171	1.83629	2.24898	4.06479	10.29794
669	0.91883	1.45280	1.83766	2.25066	4.06783	10.30565
670	0.91952	1.45388	1.83903	2.25234	4.07087	10.31335
671	0.92020	1.45497	1.84040	2.25403	4.07391	10.32104
672	0.92089	1.45605	1.84177	2.25570	4.07694	10.32873
673	0.92157	1.45713	1.84314	2.25738	4.07997	10.33641
674	0.92226	1.45822	1.84451	2.25906	4.08300	10.34409
675	0.92294	1.45930	1.84588	2.26073	4.08603	10.35176
676	0.92362	1.46038	1.84725	2.26241	4.08906	10.35942
677	0.92431	1.46146	1.84861	2.26408	4.09208	10.36708
678	0.92499	1.46254	1.84998	2.26575	4.09510	10.37474
679	0.92567	1.46361	1.85134	2.26742	4.09812	10.38238
680	0.92635	1.46469	1.85271	2.26909	4.10114	10.39003
681	0.92703	1.46577	1.85407	2.27076	4.10415	10.39766
682	0.92771	1.46684	1.85543	2.27243	4.10716	10.40529
683	0.92839	1.46792	1.85679	2.27409	4.11017	10.41292
684	0.92907	1.46899	1.85815	2.27576	4.11318	10.42054
685	0.92975	1.47007	1.85950	2.27742	4.11619	10.42815
686	0.93043	1.47114	1.86086	2.27908	4.11919	10.43576
687	0.93111	1.47221	1.86222	2.28074	4.12219	10.44337
688	0.93179	1.47328	1.86357	2.28240	4.12519	10.45097
689	0.93246	1.47435	1.86493	2.28406	4.12819	10.45856
690	0.93314	1.47542	1.86628	2.28571	4.13118	10.46614
691	0.93382	1.47649	1.86763	2.28737	4.13418	10.47373
692	0.93449	1.47756	1.86898	2.28902	4.13717	10.48130
693	0.93517	1.47863	1.87033	2.29068	4.14015	10.48887
694	0.93584	1.47969	1.87168	2.29233	4.14314	10.49644
695	0.93651	1.48076	1.87303	2.29398	4.14612	10.50400
696	0.93719	1.48182	1.87437	2.29563	4.14911	10.51155
697	0.93786	1.48289	1.87572	2.29728	4.15209	10.51910
698	0.93853	1.43395	1.87707	2.29893	4.15506	10.52664
699	0.93921	1.48501	1.87841	2.30057	4.15804	10.53418
700	0.93988	1.48608	1.87975	2.30222	4.16101	10.54171
701	0.94055	1.48714	1.88110	2.30386	4.16398	10.54924
702	0.94122	1.48820	1.88244	2.30550	4.16695	10.55676
703	0.94189	1.48926	1.88378	2.30715	4.16992	10.56428
704	0.94256	1.49032	1.88512	2.30879	4.17288	10.57179
705	0.94323	1.49137	1.88645	2.31043	4.17585	10.57930
706	0.94390	1.49243	1.88779	2.31206	4.17881	10.58680
707	0.94456	1.49349	1.88913	2.31370	4.18176	10.59429
708	0.94523	1.49454	1.89046	2.31534	4.18472	10.60178
709	0.94590	1.49560	1.89180	2.31697	4.18768	10.60927
710	0.94657	1.49665	1.89313	2.31860	4.19063	10.61674
711	0.94723	1.49771	1.89447	2.32024	4.19358	10.62422
712	0.94790	1.49876	1.89580	2.32187	4.19653	10.63169
713	0.94856	1.49981	1.89713	2.32350	4.19947	10.63915
714	0.94923	1.50086	1.89846	2.32513	4.20242	10.64661

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS						
VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
715	0.94989	1.50191	1.89979	2.32675	4.20536	10.65406
716	0.95056	1.50296	1.90111	2.32838	4.20830	10.66151
717	0.95122	1.50401	1.90244	2.33001	4.21123	10.66895
718	0.95188	1.50506	1.90377	2.33163	4.21417	10.67639
719	0.95255	1.50611	1.90509	2.33325	4.21710	10.68382
720	0.95321	1.50716	1.90642	2.33488	4.22004	10.69125
721	0.95387	1.50820	1.90774	2.33650	4.22297	10.69867
722	0.95453	1.50925	1.90906	2.33812	4.22589	10.70609
723	0.95519	1.51029	1.91039	2.33973	4.22882	10.71350
724	0.95585	1.51134	1.91171	2.34135	4.23174	10.72091
725	0.95651	1.51238	1.91303	2.34297	4.23466	10.72831
726	0.95717	1.51342	1.91434	2.34458	4.23758	10.73570
727	0.95783	1.51446	1.91566	2.34620	4.24050	10.74309
728	0.95849	1.51551	1.91698	2.34781	4.24342	10.75048
729	0.95915	1.51655	1.91830	2.34942	4.24633	10.75786
730	0.95981	1.51759	1.91961	2.35103	4.24924	10.76524
731	0.96046	1.51863	1.92093	2.35264	4.25215	10.77261
732	0.96112	1.51966	1.92224	2.35425	4.25506	10.77997
733	0.96178	1.52070	1.92355	2.35586	4.25796	10.78734
734	0.96243	1.52174	1.92486	2.35747	4.26087	10.79469
735	0.96309	1.52277	1.92617	2.35907	4.26377	10.80204
736	0.96374	1.52381	1.92748	2.36068	4.26667	10.80939
737	0.96440	1.52484	1.92879	2.36228	4.26957	10.81673
738	0.96505	1.52588	1.93010	2.36388	4.27246	10.82406
739	0.96570	1.52691	1.93141	2.36548	4.27535	10.83140
740	0.96636	1.52795	1.93271	2.36708	4.27825	10.83872
741	0.96701	1.52898	1.93402	2.36868	4.28114	10.84604
742	0.96766	1.53001	1.93532	2.37028	4.28402	10.85336
743	0.96831	1.53104	1.93663	2.37188	4.28691	10.86067
744	0.96897	1.53207	1.93793	2.37347	4.28979	10.86798
745	0.96962	1.53310	1.93923	2.37507	4.29268	10.87528
746	0.97027	1.53413	1.94053	2.37666	4.29556	10.88257
747	0.97092	1.53515	1.94183	2.37825	4.29843	10.88986
748	0.97157	1.53618	1.94313	2.37984	4.30131	10.89715
749	0.97222	1.53721	1.94443	2.38143	4.30418	10.90443
750	0.97286	1.53823	1.94573	2.38302	4.30706	10.91171
751	0.97351	1.53926	1.94703	2.38461	4.30993	10.91898
752	0.97416	1.54028	1.94832	2.38620	4.31280	10.92625
753	0.97481	1.54131	1.94962	2.38778	4.31566	10.93351
754	0.97546	1.54233	1.95091	2.38937	4.31853	10.94077
755	0.97610	1.54335	1.95220	2.39095	4.32139	10.94802
756	0.97675	1.54438	1.95350	2.39254	4.32425	10.95527
757	0.97739	1.54540	1.95479	2.39412	4.32711	10.96251
758	0.97804	1.54642	1.95608	2.39570	4.32997	10.96975
759	0.97868	1.54744	1.95737	2.39728	4.33282	10.97698
760	0.97933	1.54846	1.95866	2.39886	4.33567	10.98421
761	0.97997	1.54947	1.95995	2.40043	4.33853	10.99144

Continuación.....

TABLA DE DEFLEXIONES Y VELOCIDADES PARA DIFERENTES PESOS ESPECIFICOS DE LIQUIDOS MANOMETRICOS

VELOCIDAD EN: m/s	PESO ESPECIFICO EN: gr/cm ³ .				DEFLEXION EN: mm.	
	1.1	1.25	1.40	1.60	2.96	13.58
DEFL	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD	VELOCIDAD
762	0.98062	1.55049	1.96123	2.40201	4.34138	10.99866
763	0.98126	1.55151	1.96252	2.40359	4.34422	11.00587
764	0.98190	1.55252	1.96381	2.40516	4.34707	11.01308
765	0.98255	1.55354	1.96509	2.40673	4.34991	11.02029
766	0.98319	1.55456	1.96637	2.40831	4.35276	11.02749
767	0.98383	1.55557	1.96766	2.40988	4.35560	11.03468
768	0.98447	1.55658	1.96894	2.41145	4.35843	11.04187
769	0.98511	1.55760	1.97022	2.41302	4.36127	11.04906
770	0.98575	1.55861	1.97150	2.41459	4.36411	11.05624
771	0.98639	1.55962	1.97278	2.41615	4.36694	11.06342
772	0.98703	1.56063	1.97406	2.41772	4.36977	11.07059
773	0.98767	1.56164	1.97534	2.41929	4.37260	11.07776
774	0.98831	1.56265	1.97662	2.42085	4.37543	11.08492
775	0.98895	1.56366	1.97789	2.42241	4.37825	11.09208
776	0.98958	1.56467	1.97917	2.42398	4.38108	11.09923
777	0.99022	1.56568	1.98044	2.42554	4.38390	11.10638
778	0.99086	1.56668	1.98172	2.42710	4.38672	11.11353
779	0.99150	1.56769	1.98299	2.42866	4.38954	11.12067
780	0.99213	1.56870	1.98426	2.43022	4.39235	11.12780
781	0.99277	1.56970	1.98553	2.43177	4.39517	11.13494
782	0.99340	1.57071	1.98680	2.43333	4.39798	11.14206
783	0.99404	1.57171	1.98807	2.43488	4.40079	11.14918
784	0.99467	1.57271	1.98934	2.43644	4.40360	11.15630
785	0.99531	1.57372	1.99061	2.43799	4.40641	11.16341
786	0.99594	1.57472	1.99188	2.43954	4.40921	11.17052
787	0.99657	1.57572	1.99315	2.44110	4.41202	11.17763
788	0.99721	1.57672	1.99441	2.44265	4.41482	11.18472
789	0.99784	1.57772	1.99568	2.44420	4.41762	11.19182
790	0.99847	1.57872	1.99694	2.44574	4.42042	11.19891
791	0.99910	1.57972	1.99821	2.44729	4.42322	11.20599
792	0.99973	1.58072	1.99947	2.44884	4.42601	11.21308
793	1.00036	1.58172	2.00073	2.45038	4.42880	11.22015
794	1.00100	1.58271	2.00199	2.45193	4.43160	11.22723
795	1.00163	1.58371	2.00325	2.45347	4.43439	11.23429
796	1.00226	1.58470	2.00451	2.45501	4.43717	11.24136
797	1.00288	1.58570	2.00577	2.45656	4.43996	11.24842
798	1.00351	1.58669	2.00703	2.45810	4.44274	11.25547
799	1.00414	1.58769	2.00828	2.45964	4.44553	11.26252
800	1.00477	1.58868	2.00954	2.46117	4.44831	11.26957

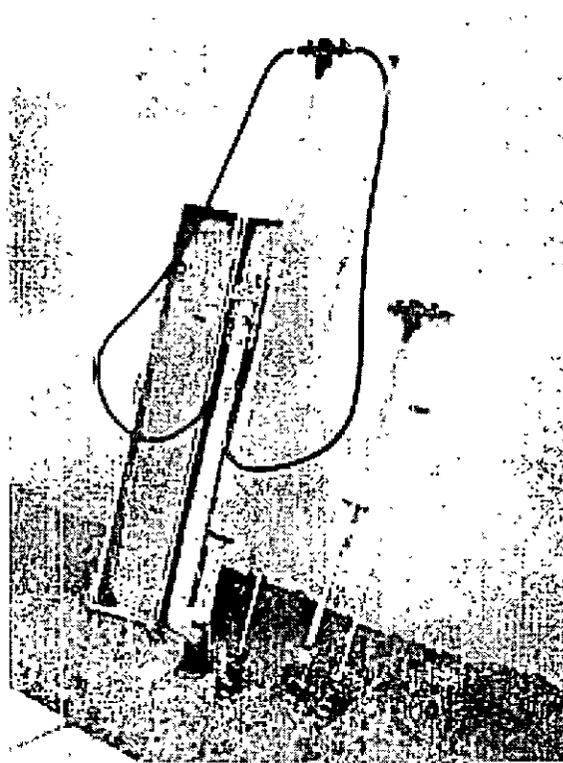


FIGURA No.1

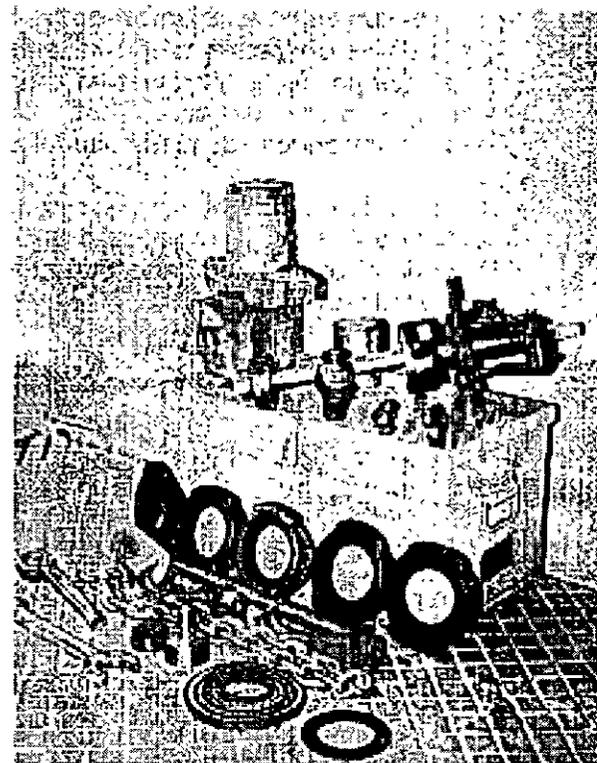
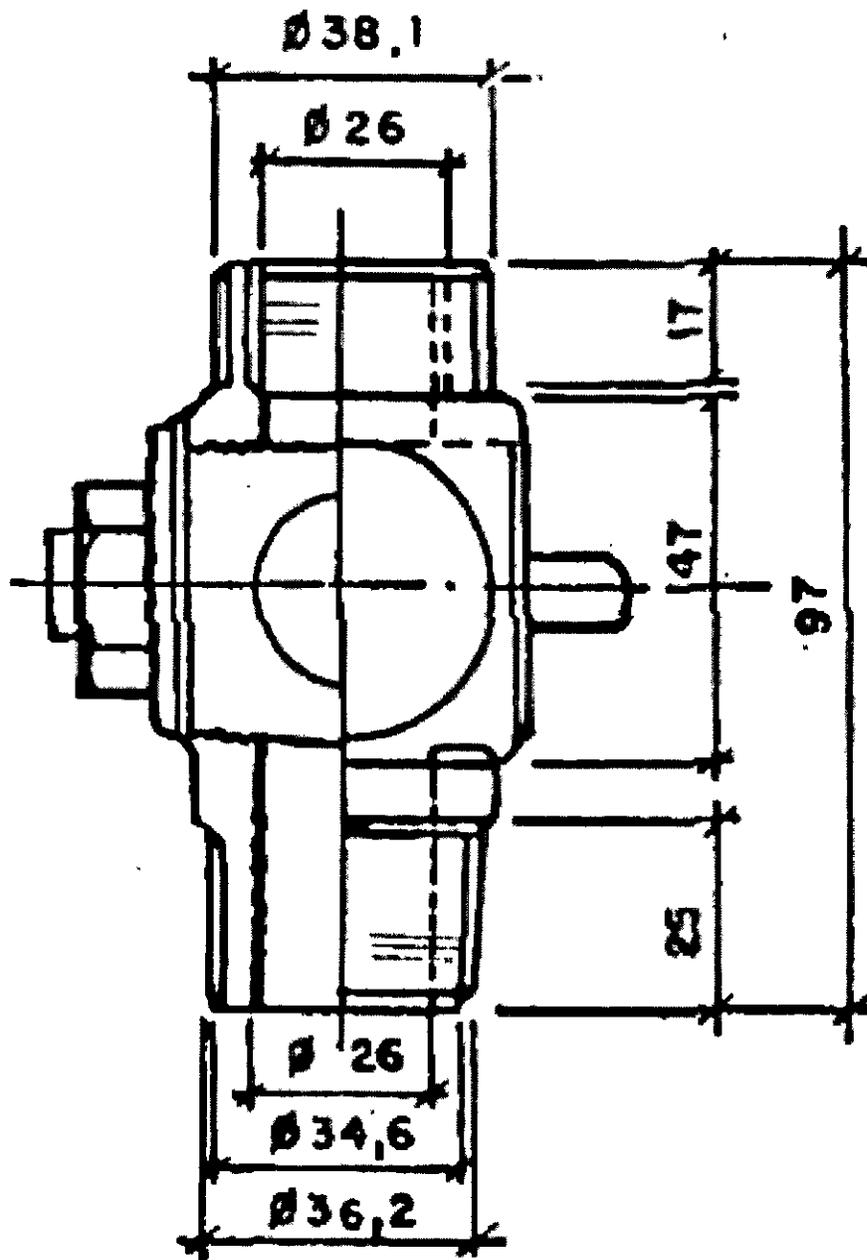


FIGURA No.2



Acotación en mm.



Válvula de inserción
Figura No. 3

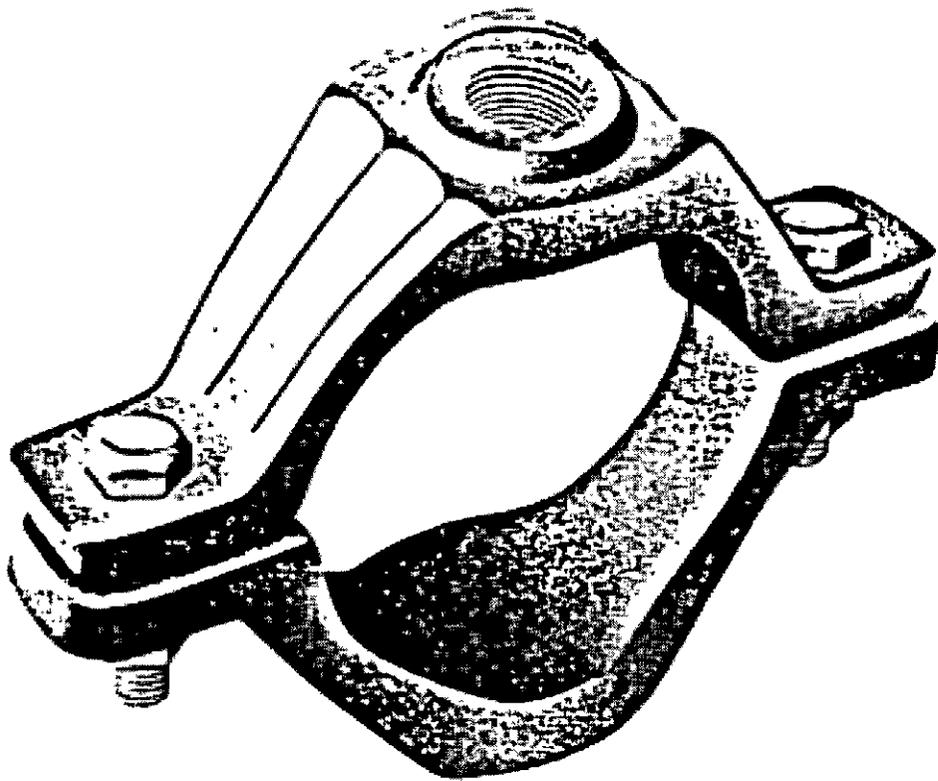


Figura No. 4

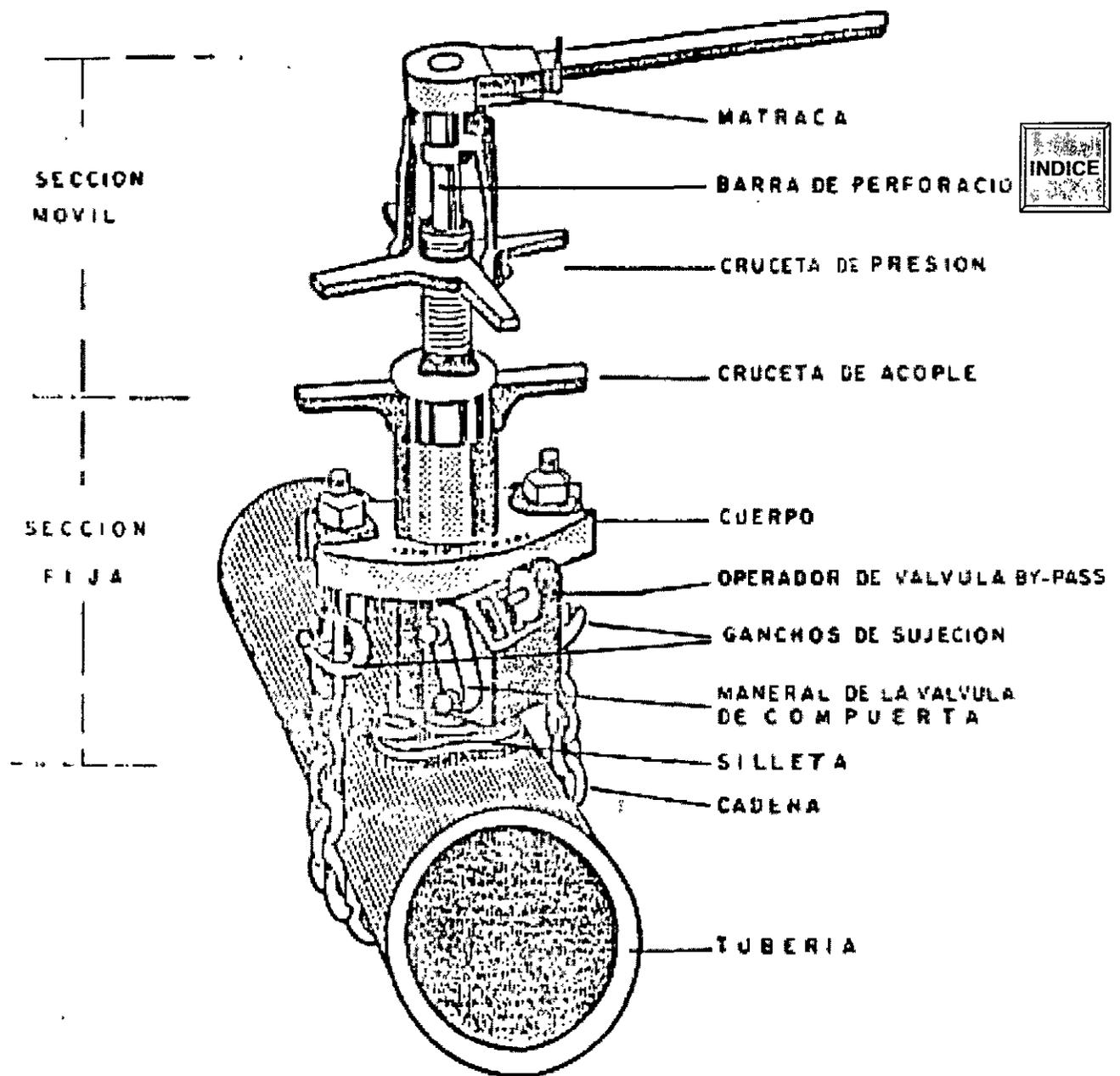


cc

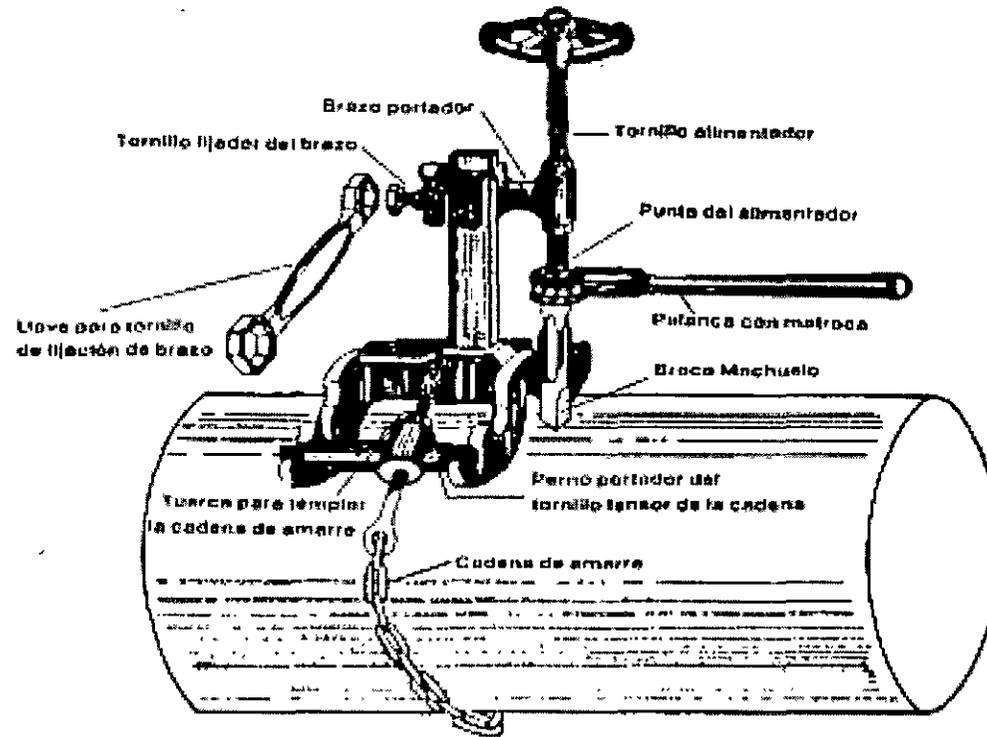


**Machuelos para cuerda tipo A.W.W.A. (Mueller)
figura No. 5**

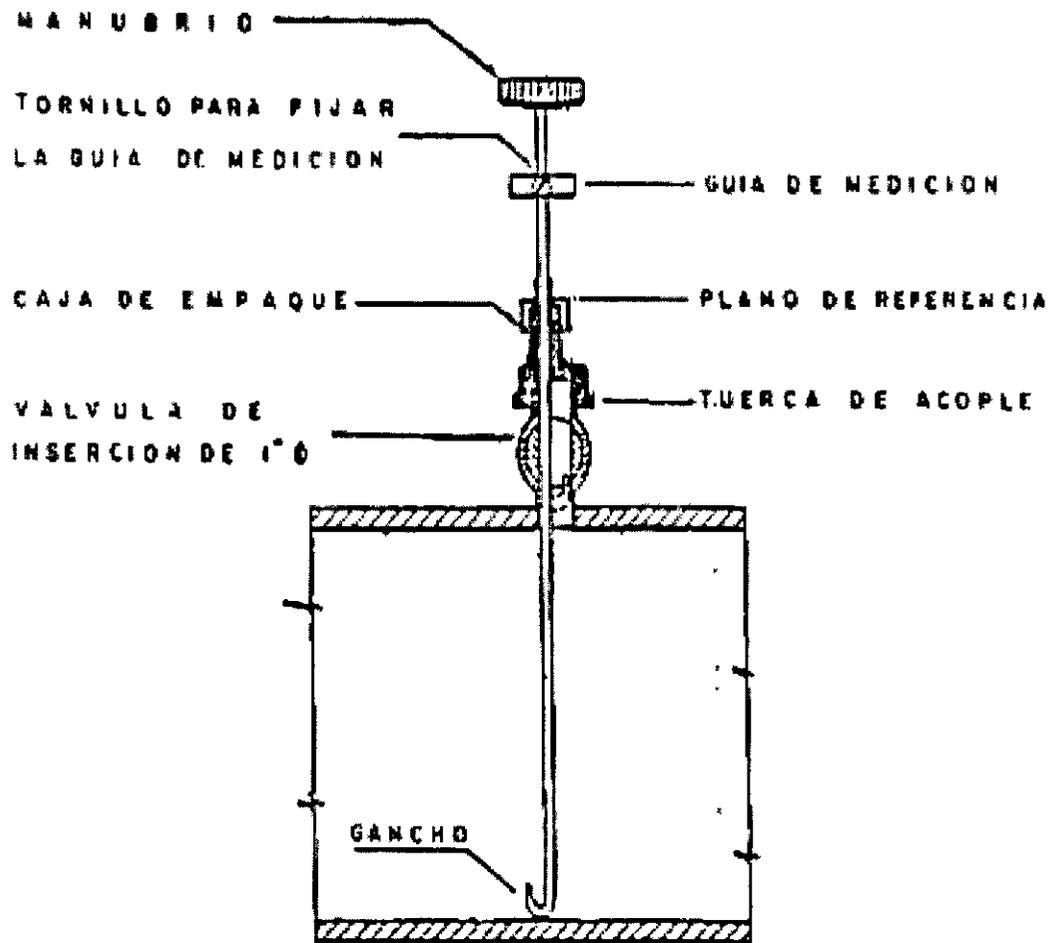




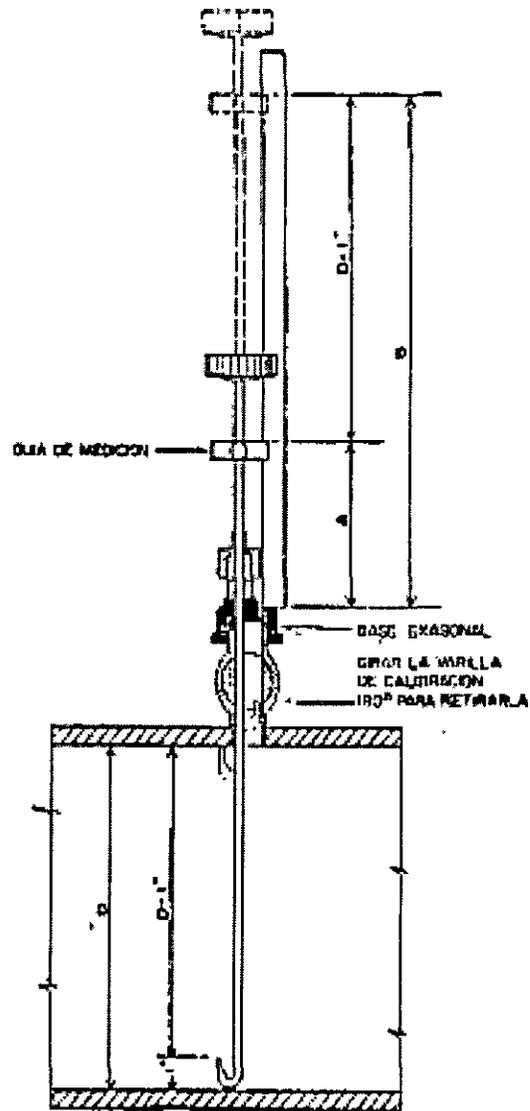
**Máquina insercionadora (Mueller) para tuberías a presión.
Figura No. 6**



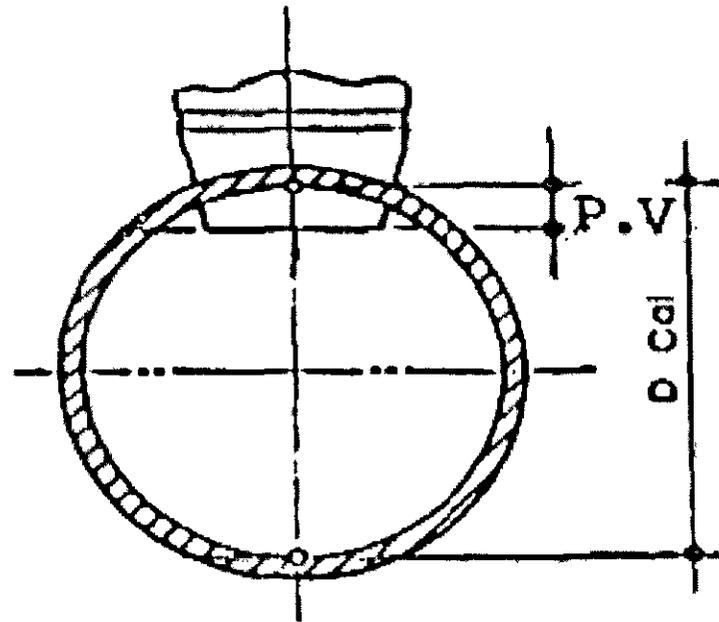
**Máquina insercionadora (Mueller) para tuberías vacías.
figura No. 7**



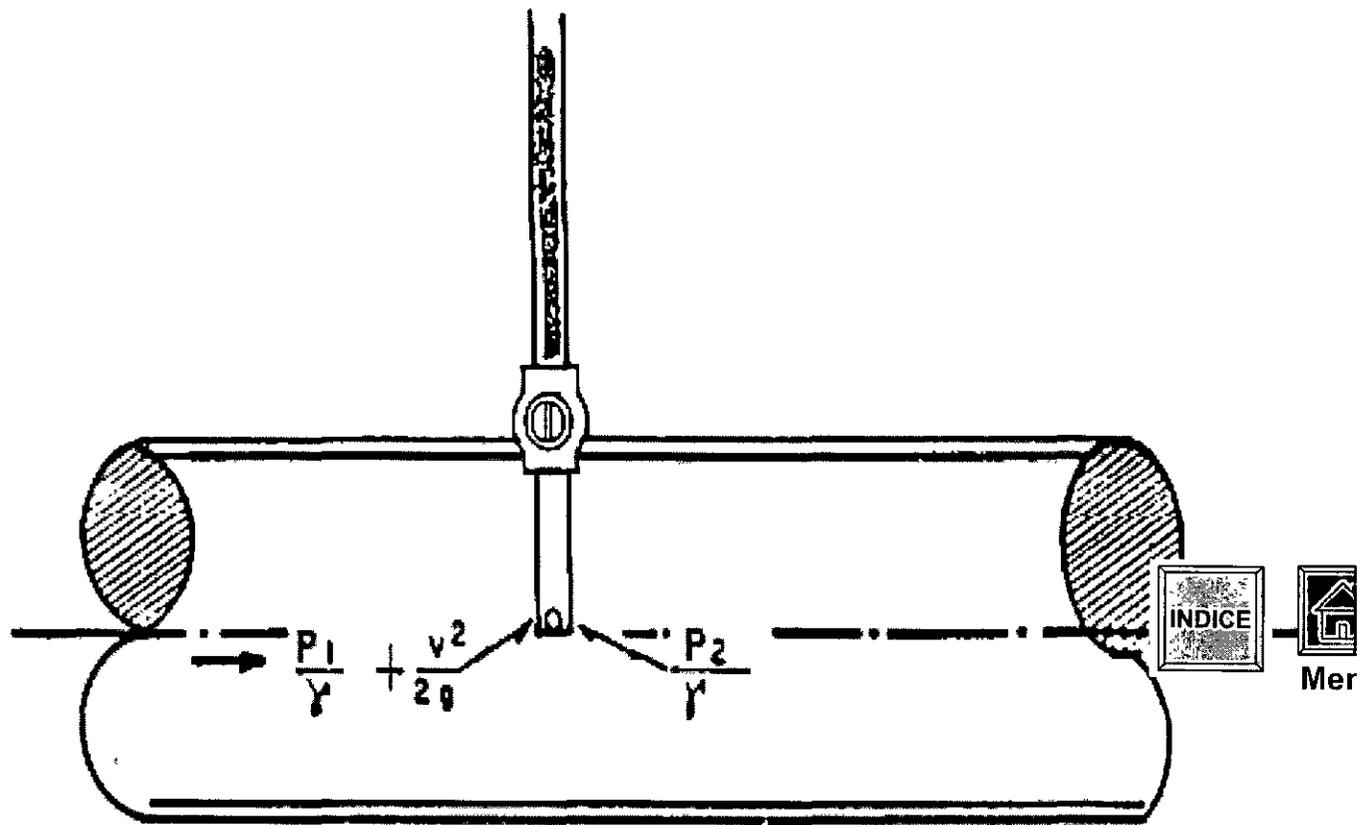
Varilla de calibración.
Figura No. 8



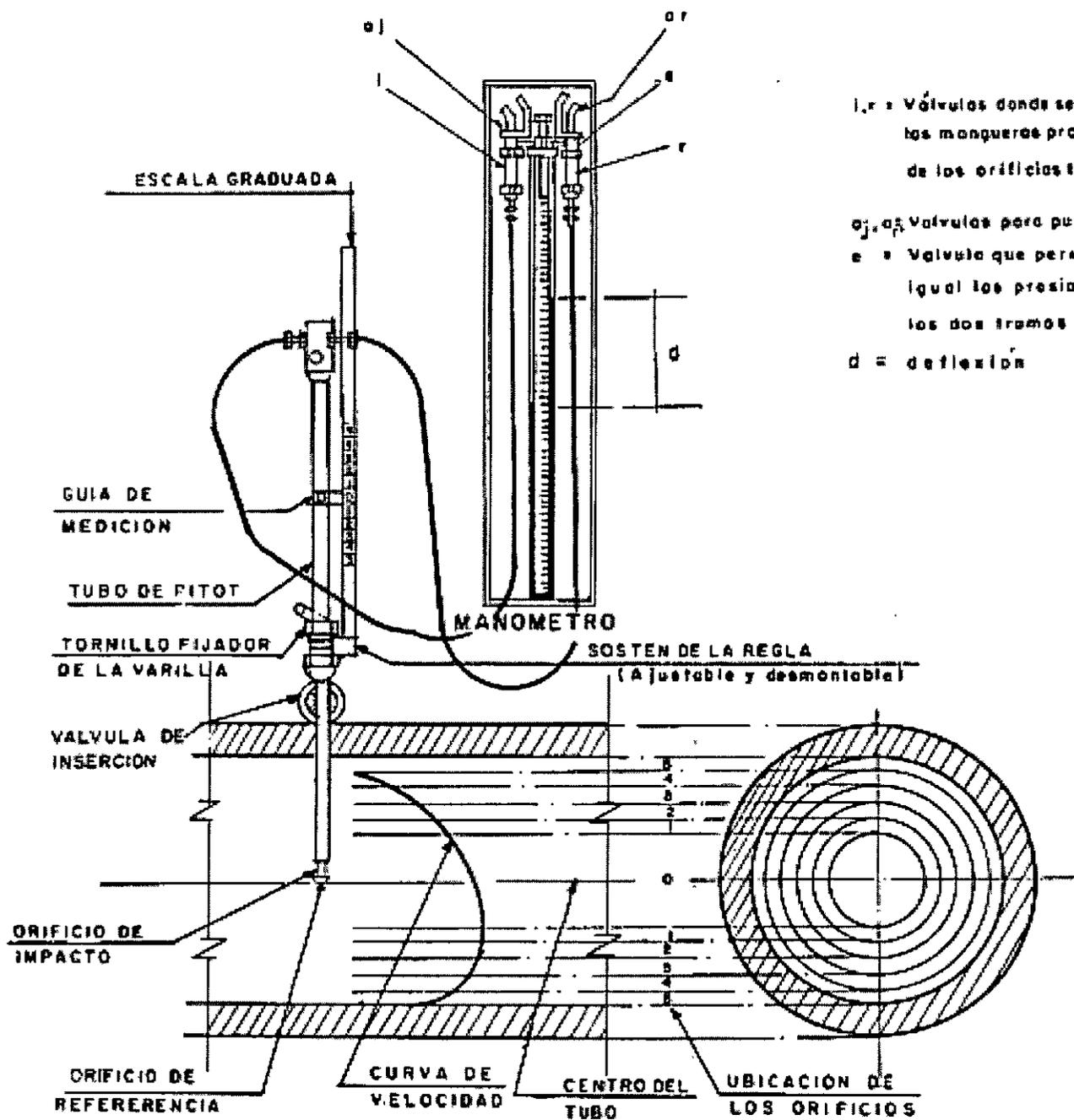
Diámetro real de la tubería.
Figura No. 9



**Proyección de la válvula de inserción. (P.V.)
Figura No. 10**



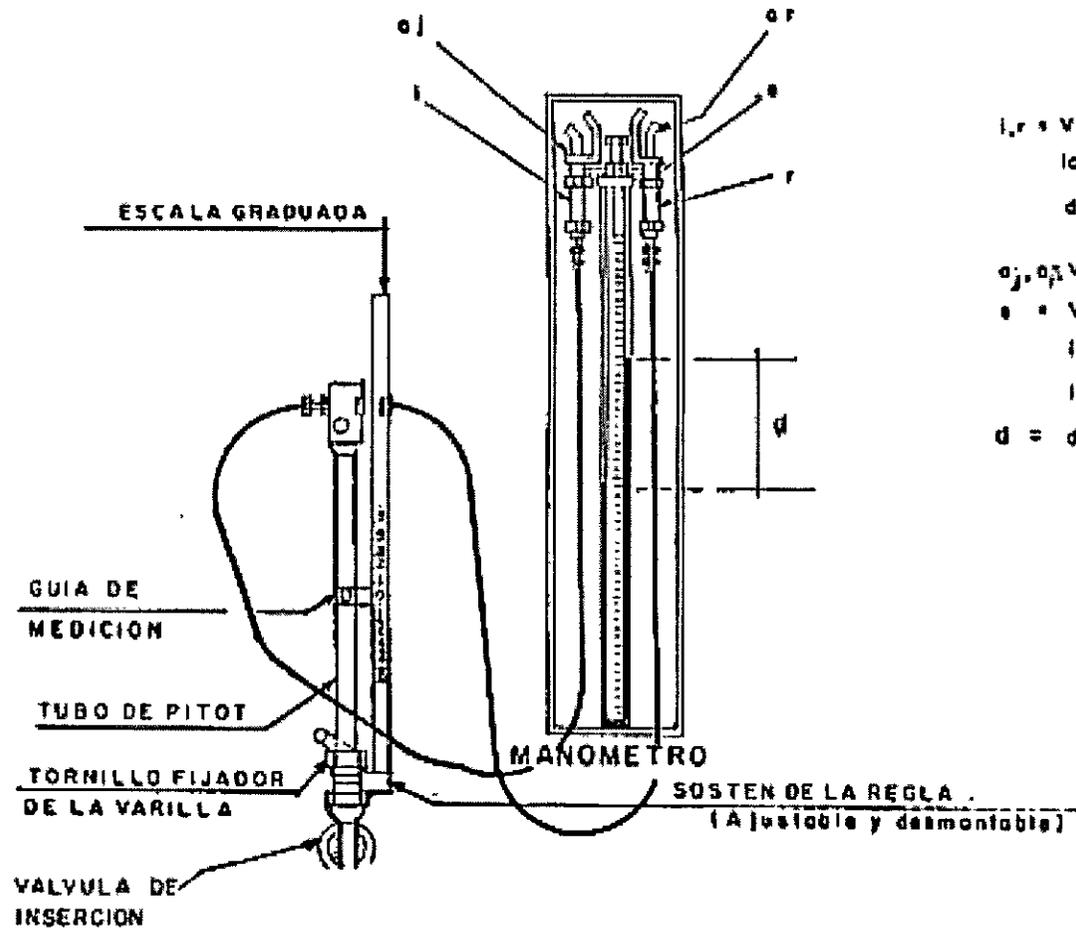
Esquema de las cargas que actúan sobre los orificios.
Figura No. 11



r, r' = Válvulas donde se acoplan los mangueras provenientes de los orificios t o t'
 a, a' = Válvulas para pu
 e = Válvula que permite igual las presiones entre los dos brazos del tubo U
 d = deflexión



Equipo de pitometría
Figura No. 12



l, r = Válvulas donde se acoplan
 las mangueras provenientes
 de los orificios l y R del pitot.

a, a' = Válvulas para purge de aire
 e = Válvula que permite
 igual los presio
 los dos brazos
 d = deflexión



Menú

Manómetro diferencial
 Figura No.13

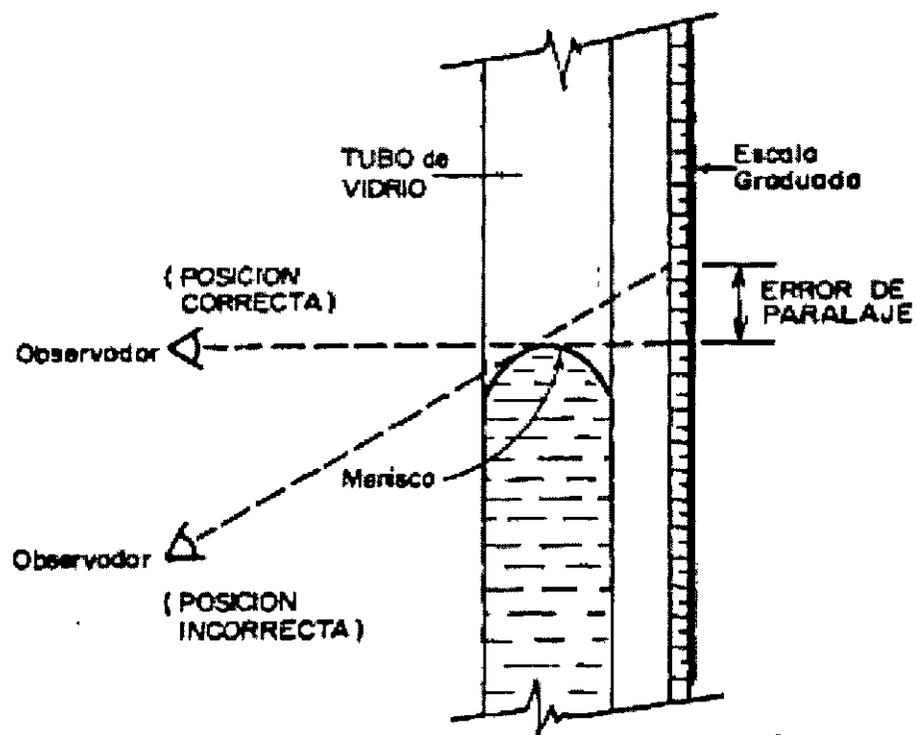
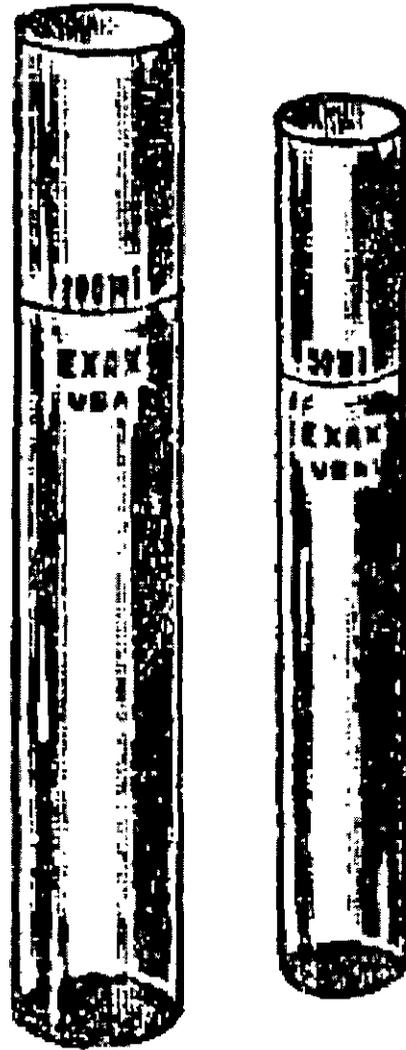


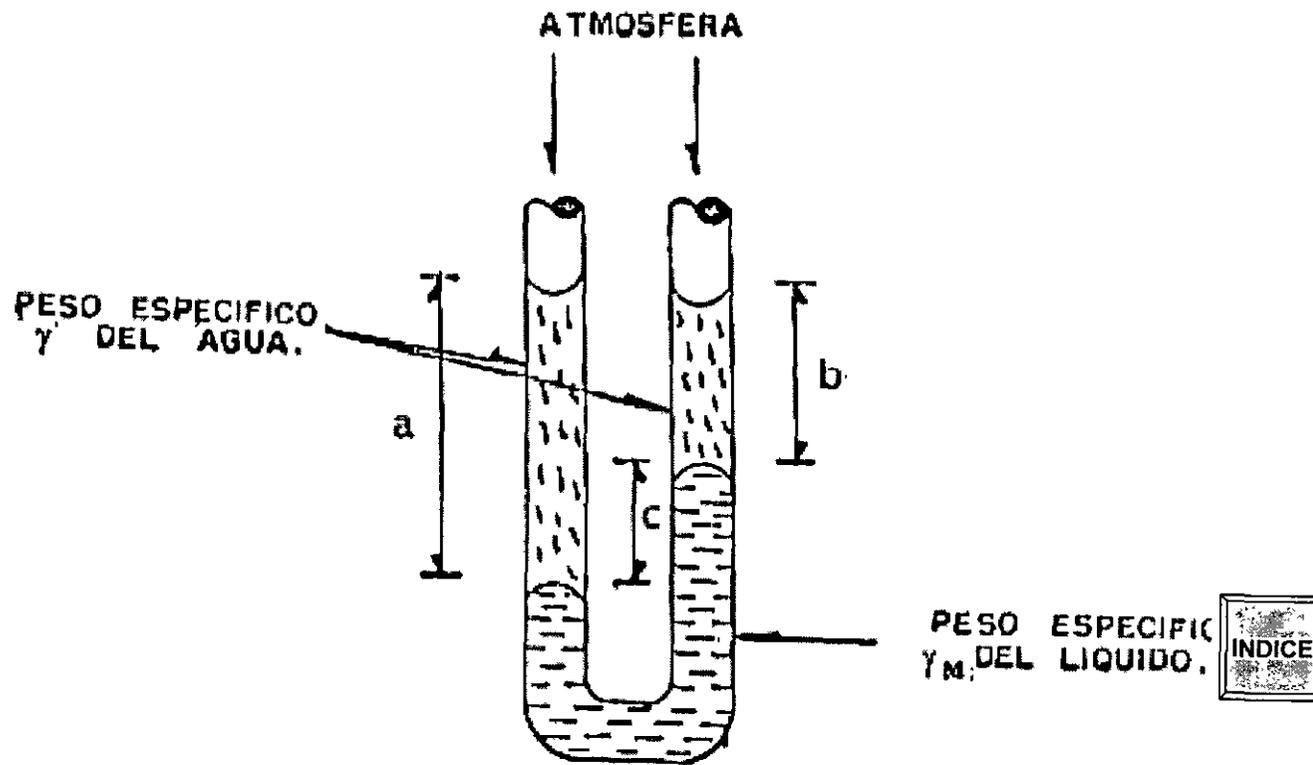
Figura No. 14



**Densímetro
Figura No. 15.**



**Tubo Nessler
Figura No. 16**



VERIFICACIÓN DEL PESO ESPECIFICO
 POR MEDIO DEL MANÓMETRO U.
 Figura No. 17

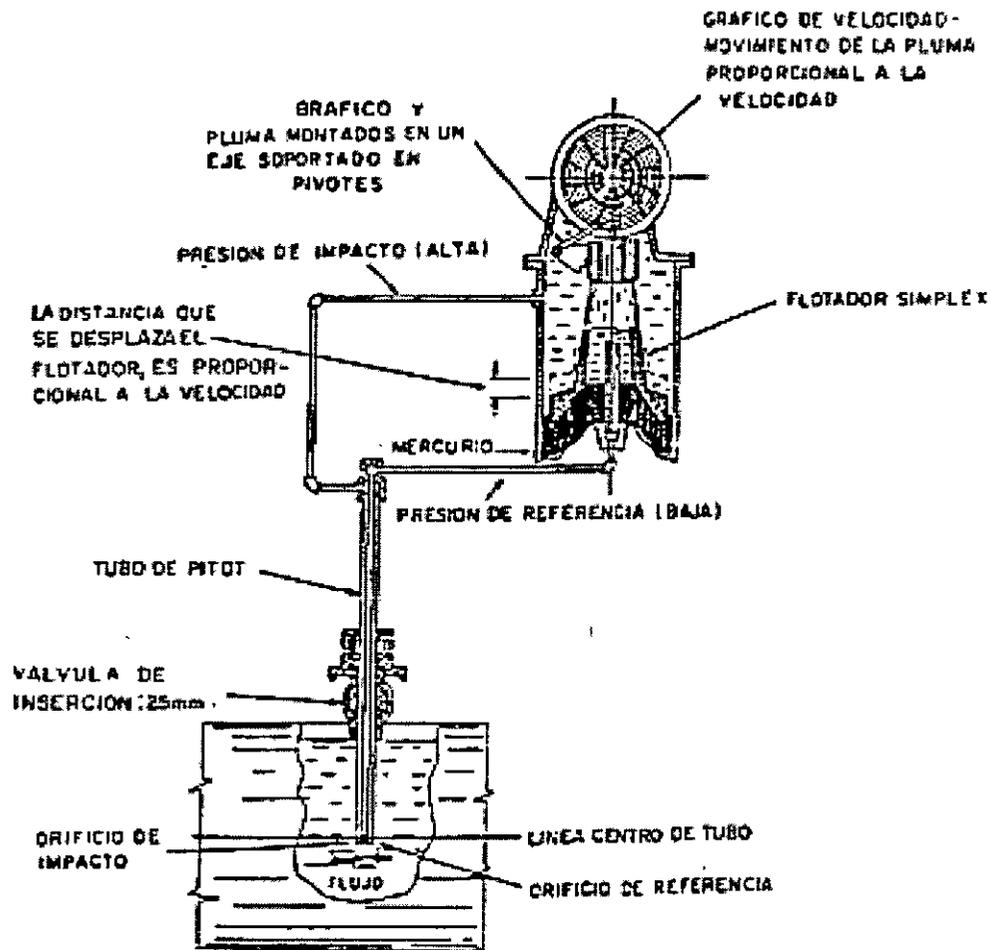
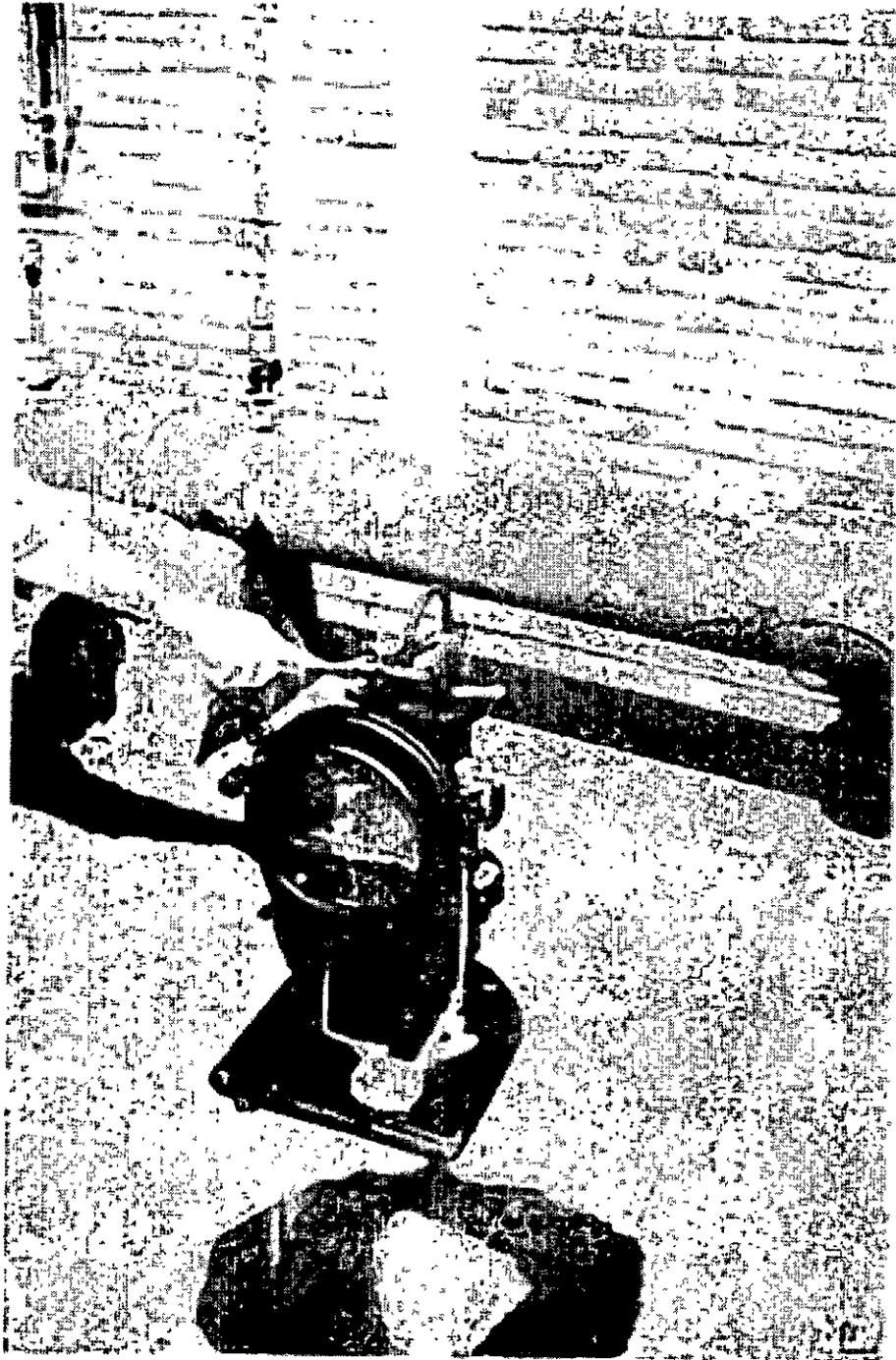


Figura No. 18



**Retiro de la cubierta de protección
Figura No. 19**



Retiro del asa de transporte
Figura No. 20

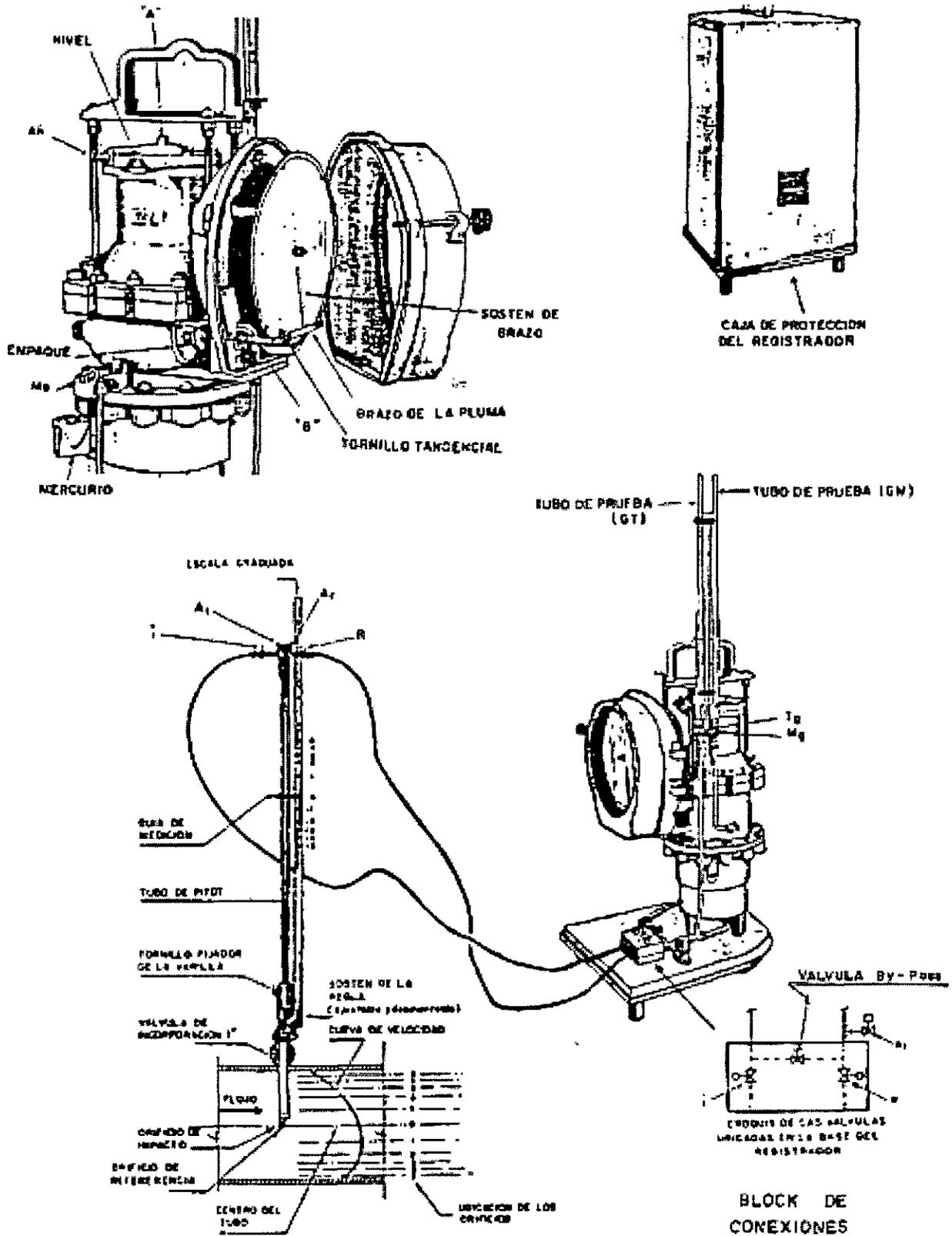


Figura No. 21

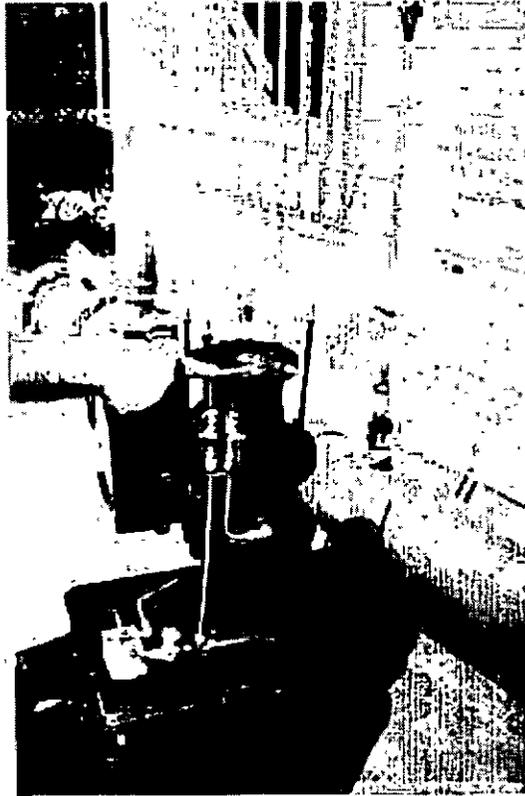


Figura No. 22



Figura No. 23



Menú

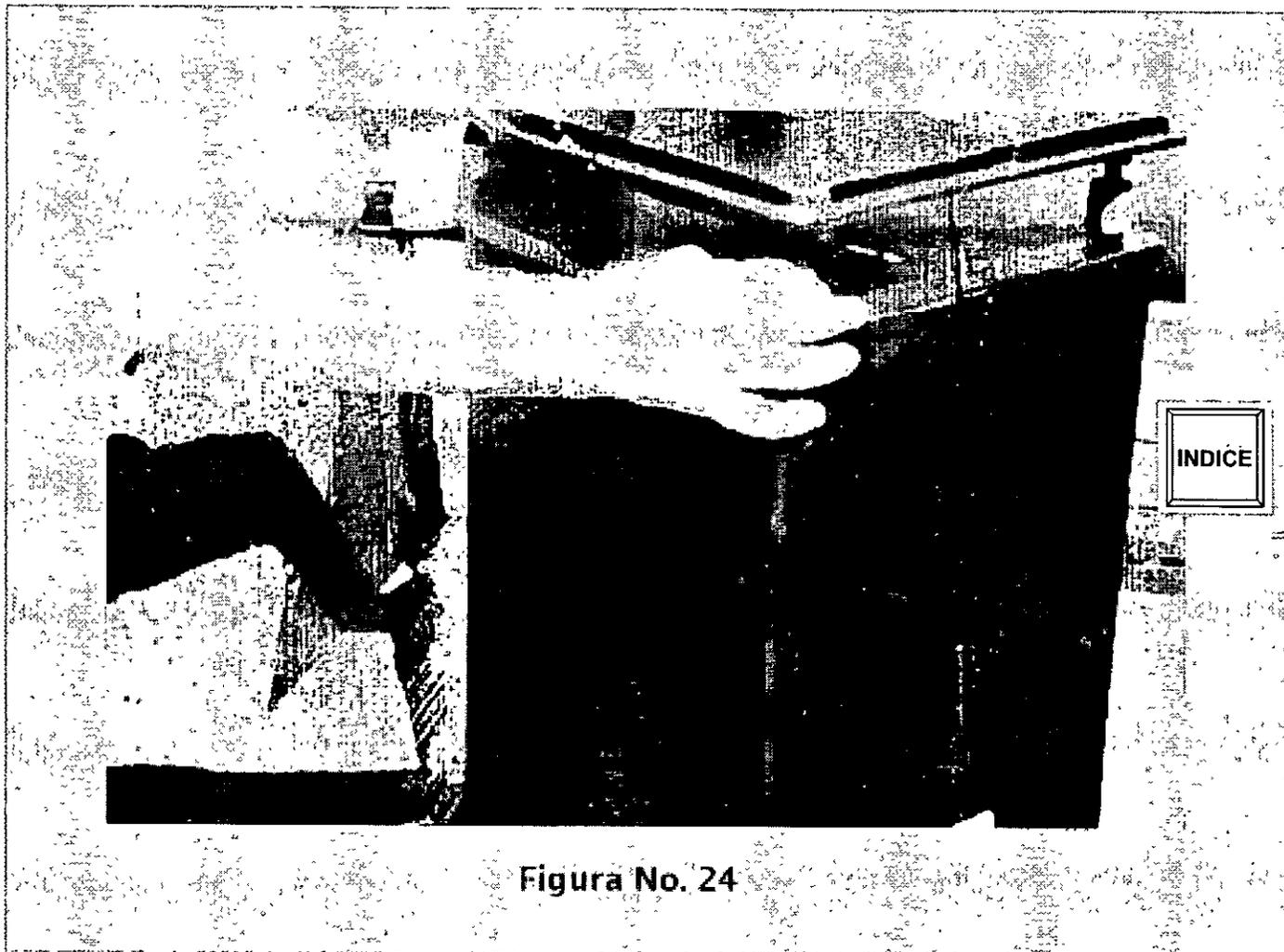


Figura No. 24

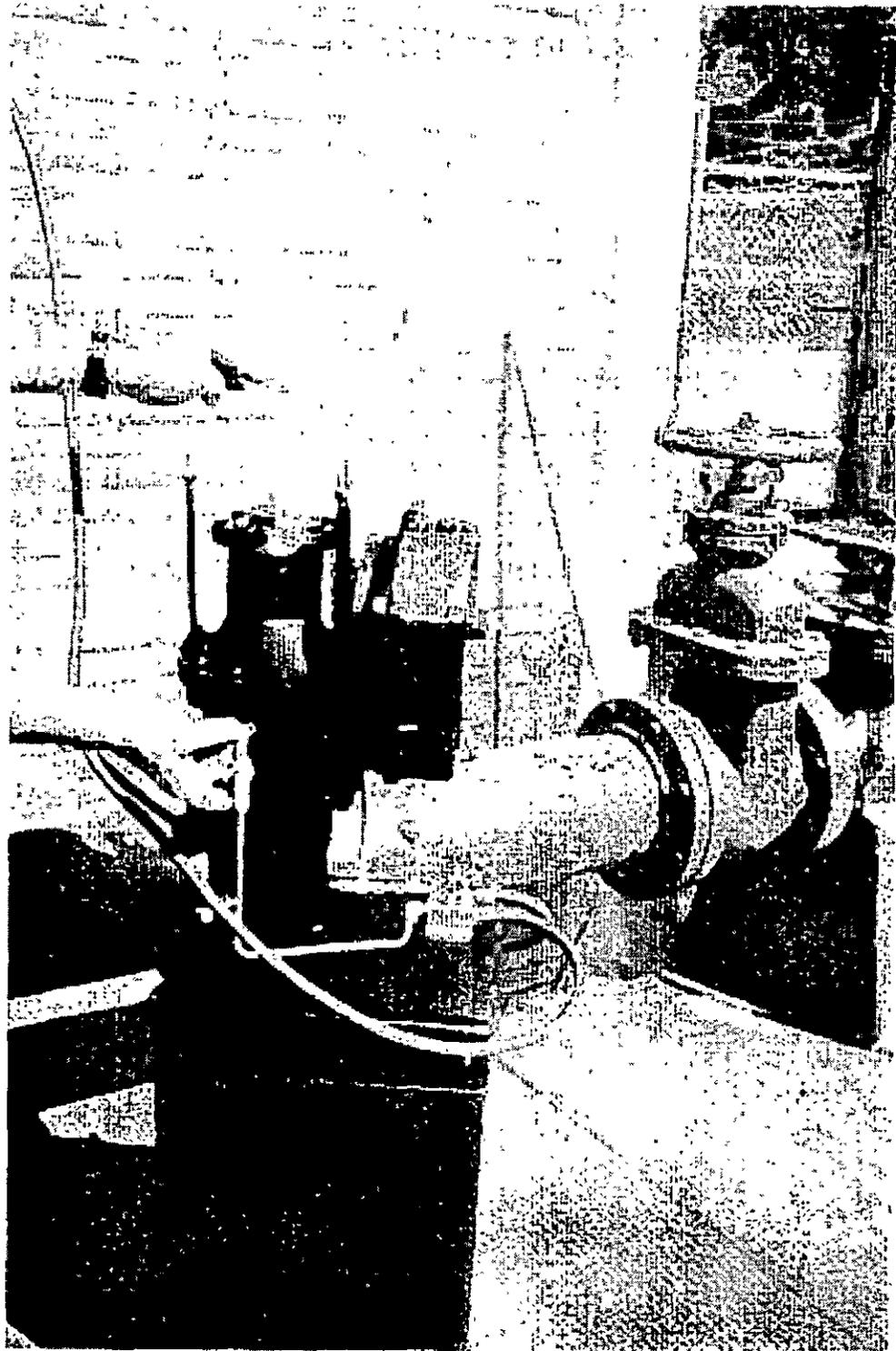
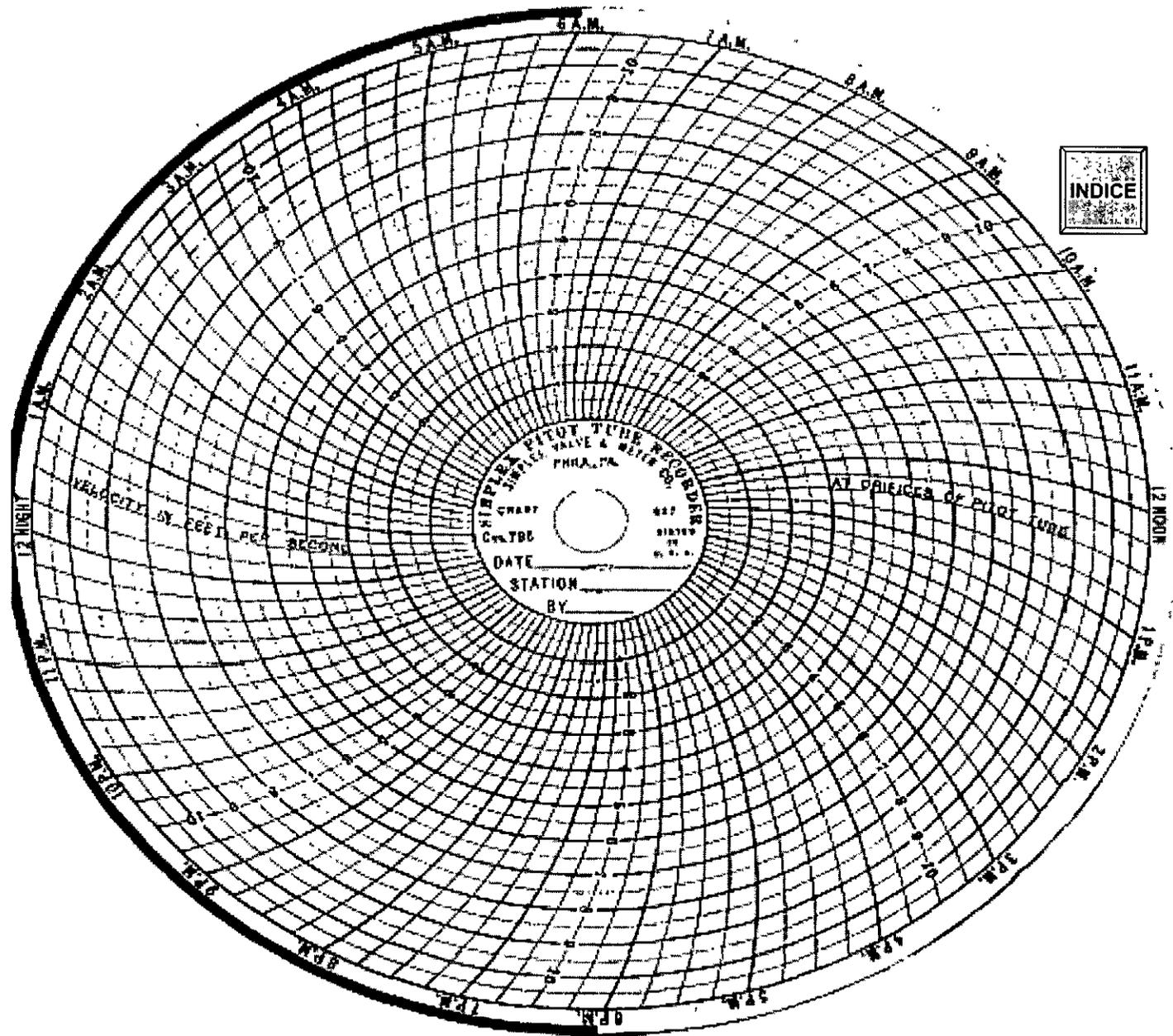


Figura No. 25
Purga del registrador.



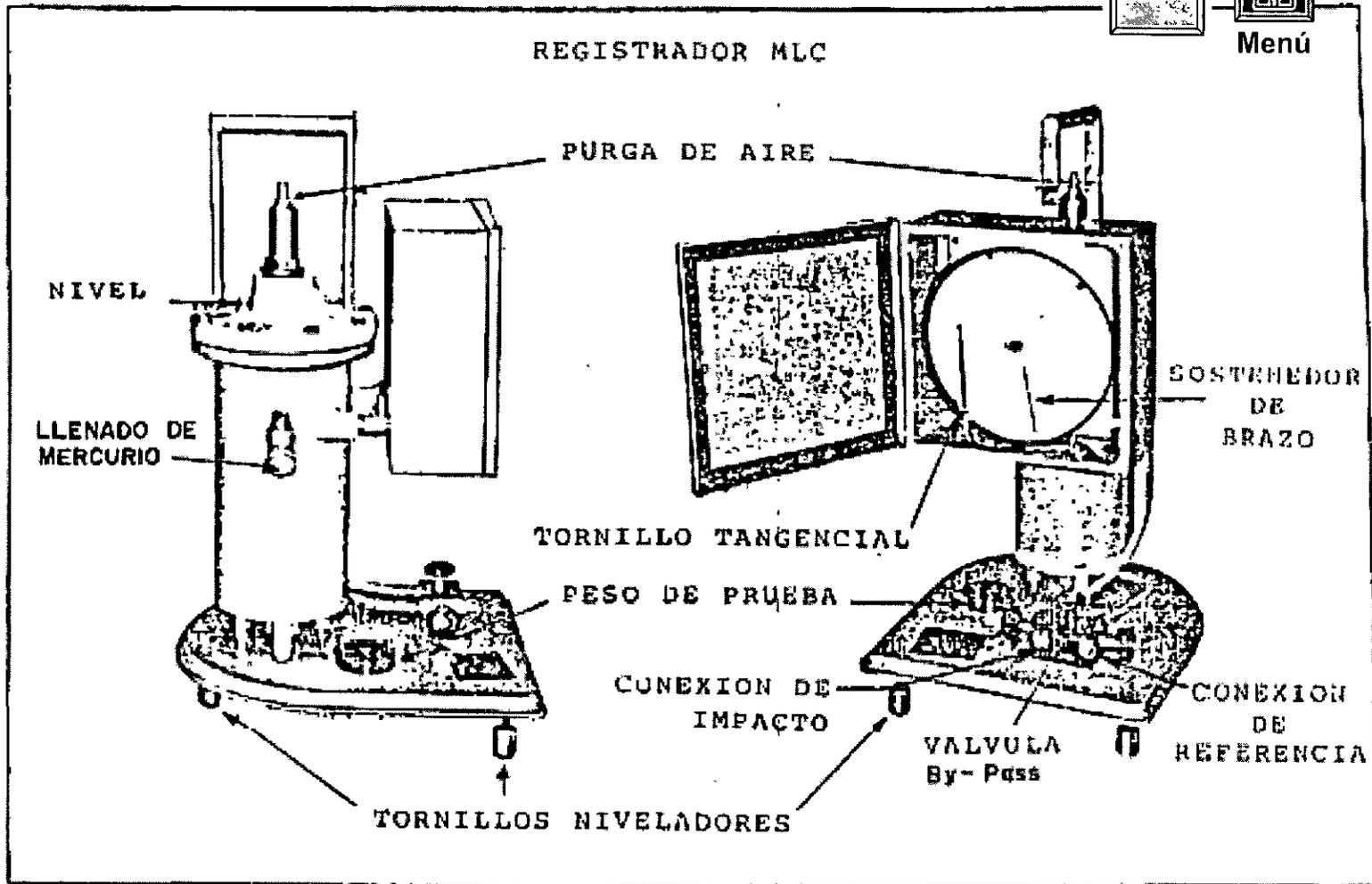
Menú

Gráfica de velocidad
Figura No. 26



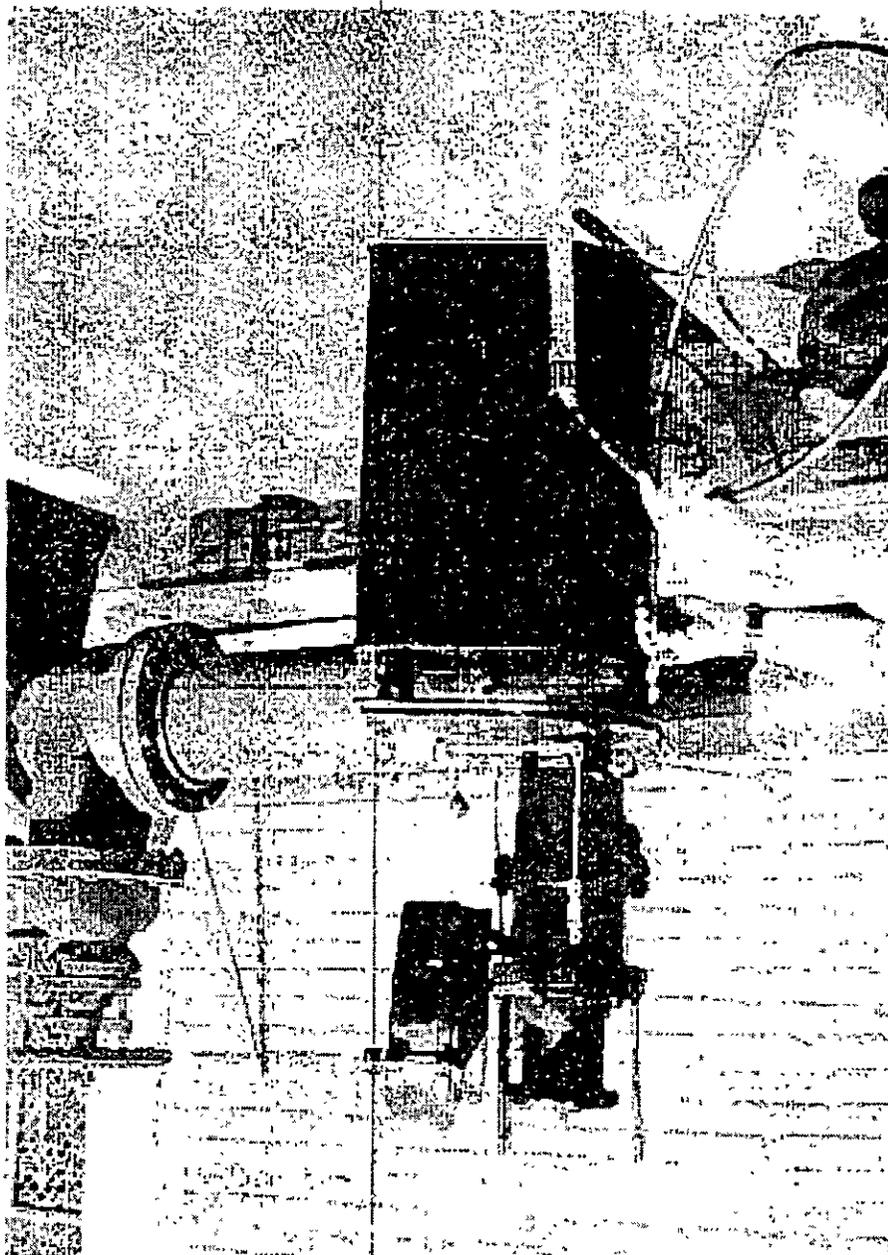
Figura No. 27

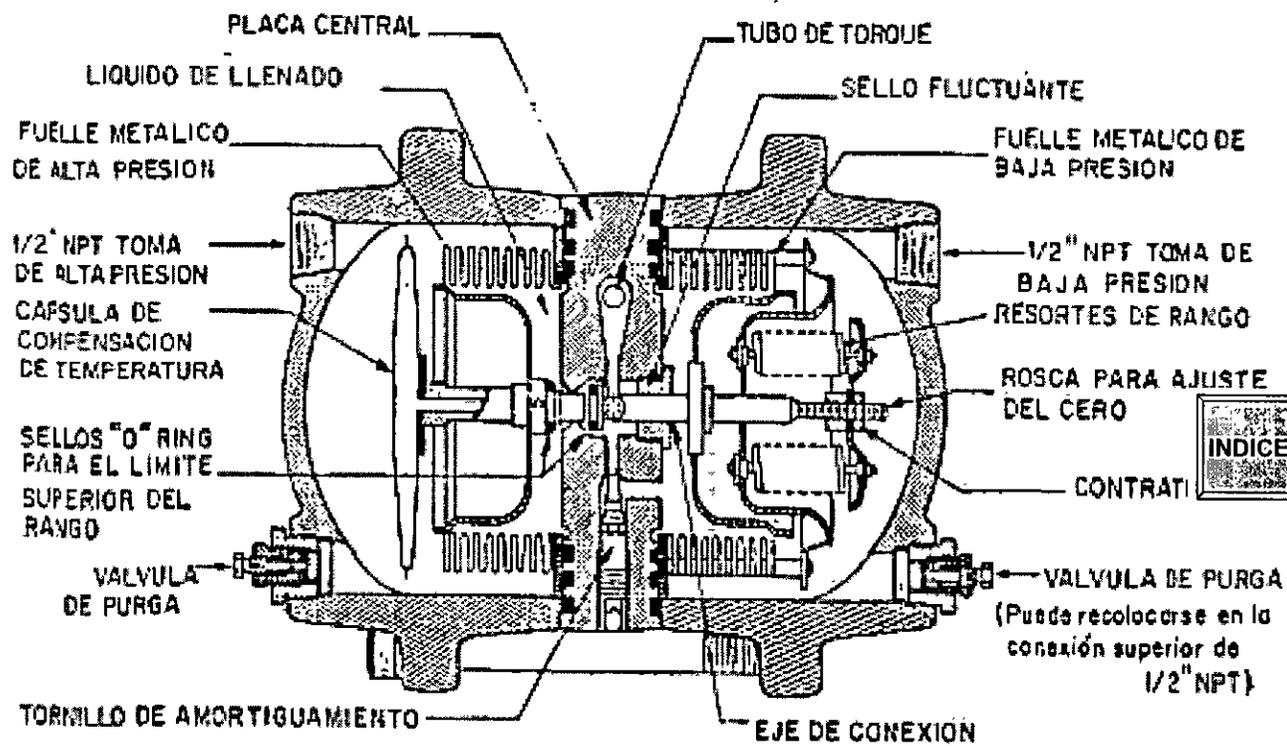
REGISTRADOR MLC



Registrador Moderno.
Figura No. 28

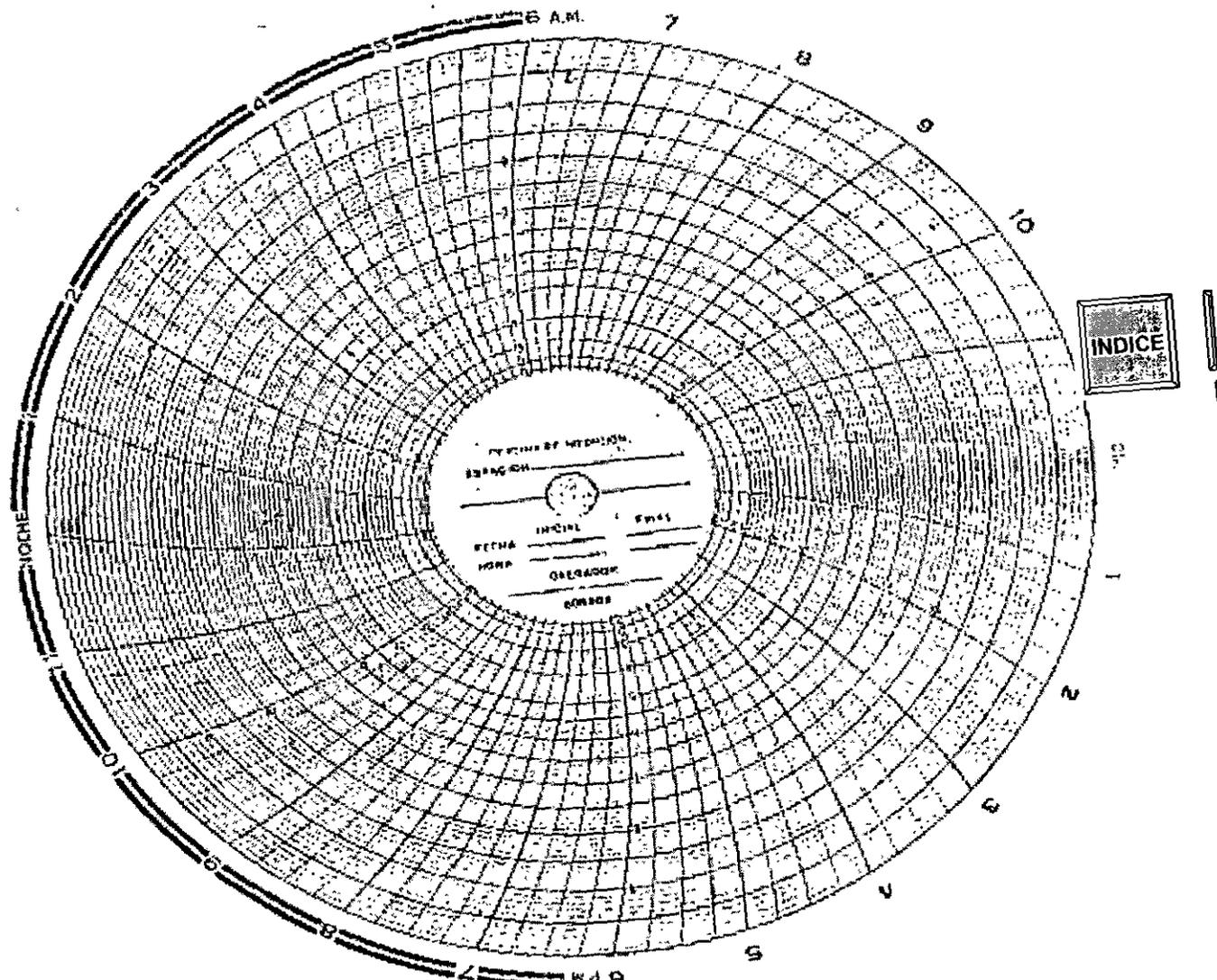
Figura No. 29





Menú

Figura No. 30



Wd 9
Carta Gráfica.
Figura No. 31.

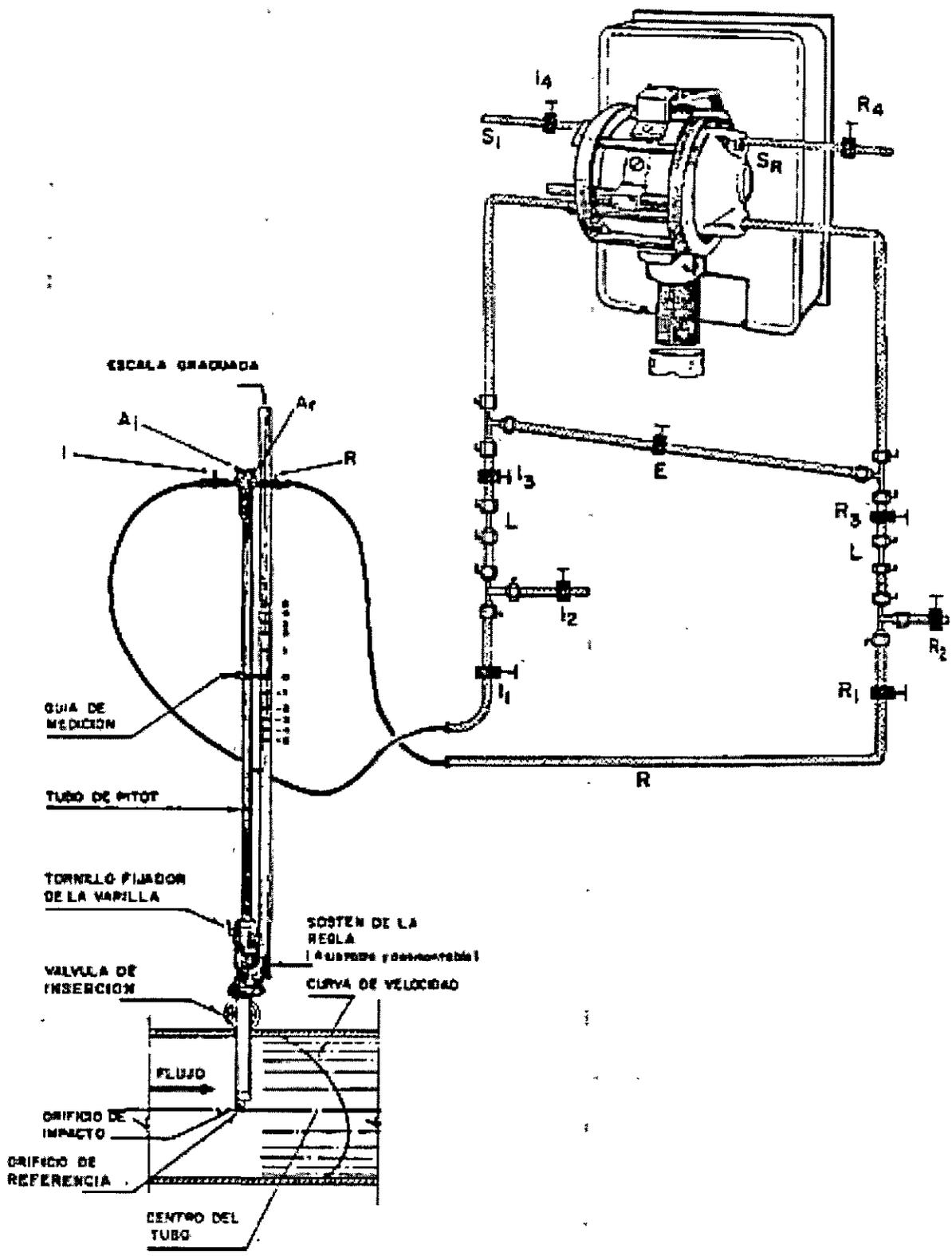


Figura No. 32

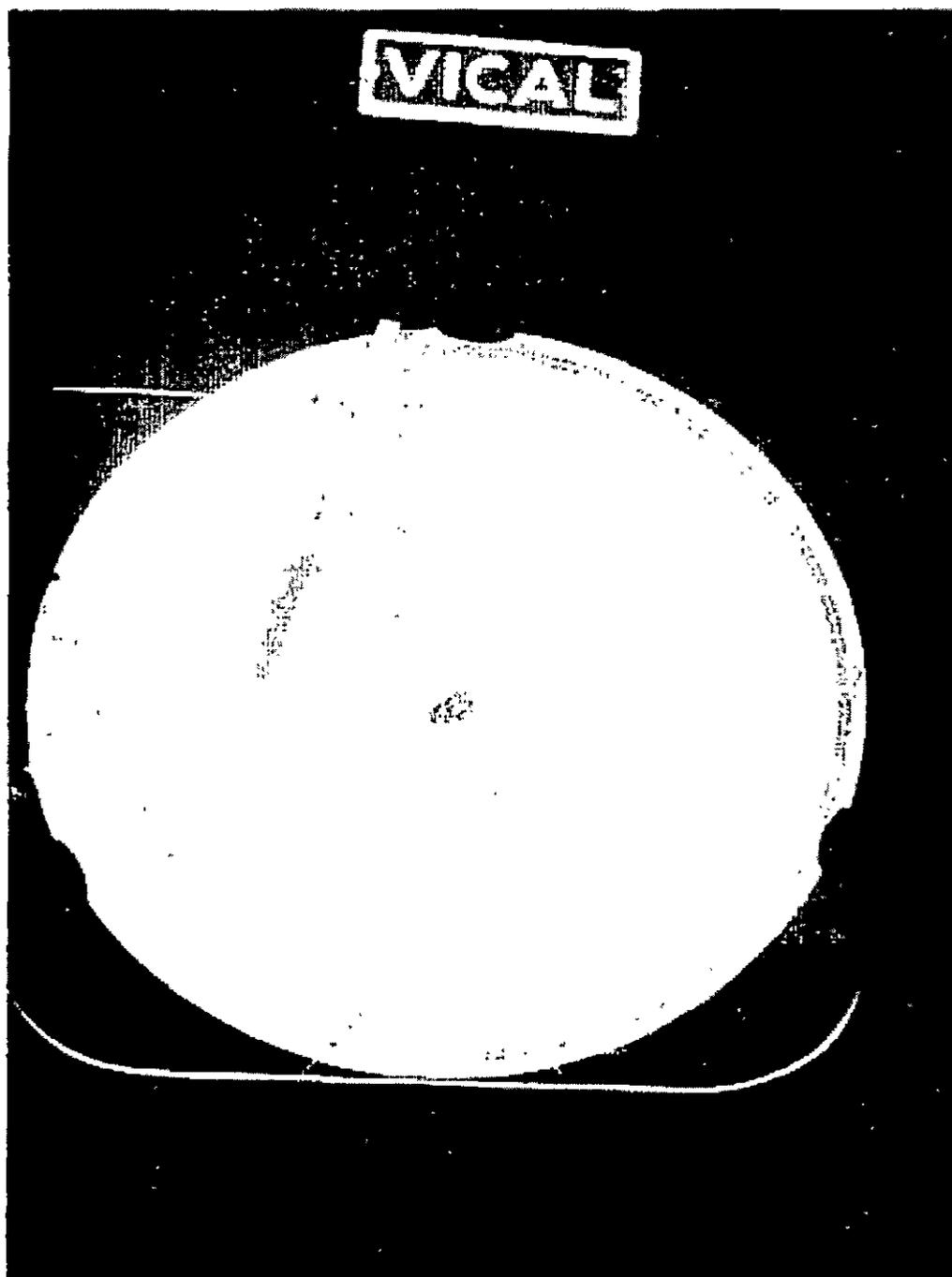


Figura No. 33

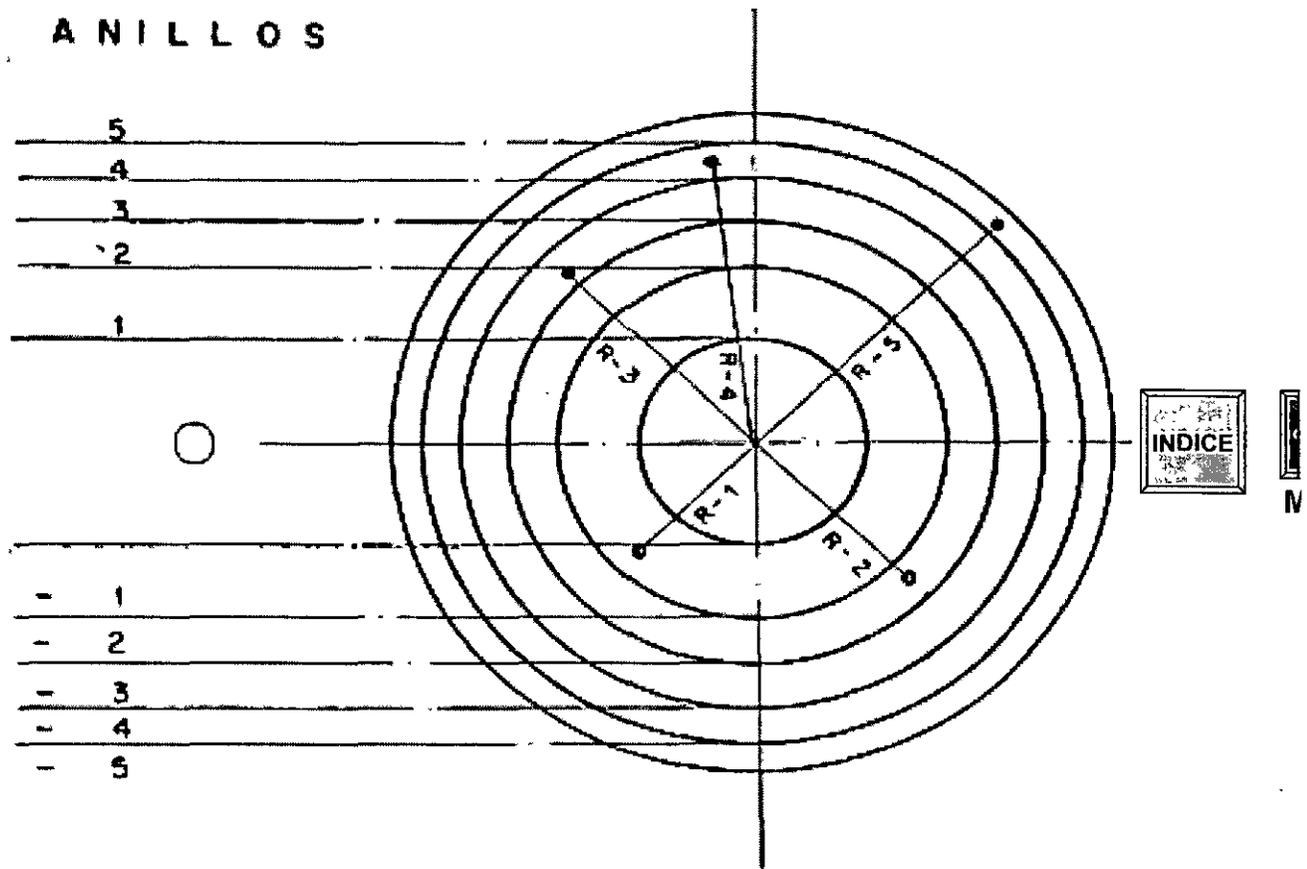
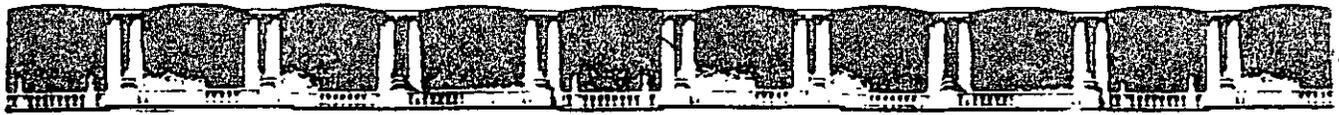


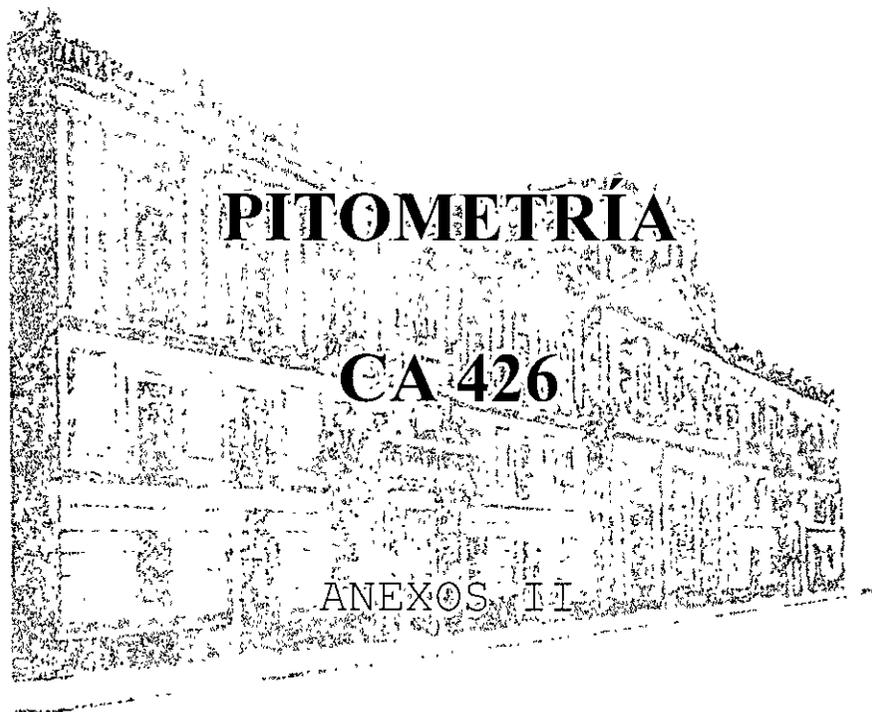
Figura No. 34.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**



**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

4. EL FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES A SUPERFICIE LIBRE

4.1 Características generales del flujo en un canal

El flujo de un fluido en un canal se caracteriza por la exposición de una superficie libre a la presión atmosférica. Por esta razón, el fluido respectivo es siempre un líquido, casi siempre agua.

El flujo en canales es más complejo que el de un conducto a presión puesto que el agua que fluye en un canal se ve afectada por todas las fuerzas presentes en el flujo dentro de un tubo, más las fuerzas de gravedad y de tensión superficial que como consecuencia directa de la superficie libre. En realidad la superficie libre se debe considerar como una pared entre dos fluidos, el superior un gas usualmente estacionario (la atmósfera), y el inferior, un líquido en movimiento. Las fuerzas de gravedad y tensión superficial resistirán cualquier fuerza tendiente a distorsionar esta pared, la cual siempre constituirá una frontera sobre la cual se tiene un control parcial.

De acuerdo con su origen, un canal puede ser natural o artificial. Dentro de los primeros se incluyen todos los cursos de agua que existen en forma natural sobre la tierra, tales como arroyos, ríos, etc. Dentro de los canales artificiales se incluyen todos los construidos por el hombre, tales como canales de navegación, canales de fuerza, canales de riego, obras de excedencias, etc.

Si el canal se construye con una sección transversal y pendiente constante, se denomina canal prismático. De no satisfacerse estas condiciones, el canal es no prismático, como es el caso de los canales naturales.

Si el canal es natural (y en algunos casos artificial), se presenta una nueva dificultad cuando el escurrimiento se relaciona con el transporte de sedimentos; es decir, cuando el río, en su recorrido desde las montañas hasta valle, lleva consigo cuerpos sólidos más o menos grandes (arena, grava y hasta grandes piedras) que modifican constantemente la forma de las fronteras sólidas e impiden una definición todavía más exacta de la rugosidad de la pared. Este escurrimiento tan complejo se estudia con detenimiento en la hidráulica fluvial que, por sí sola, forma una disciplina fuera de los alcances de este curso, en cuyo contenido se supondrá que en los canales no cambia la forma de su frontera.

4.2 Tipos de flujo

La clasificación del flujo en un canal, sobre la base de que en todos los casos el flujo es unidimensional, es la siguiente:

4.2.1 Flujo permanente y no permanente.

Esta clasificación obedece a la utilización del tiempo como un criterio. El flujo es permanente si el tirante permanece constante en cualquier instante o en un lapso especificado. Lo contrario acontece si el flujo es no permanente. El caso más común de flujo permanente es aquel de un canal en que el gasto es constante en cualquier sección transversal del mismo; otros casos de

flujo permanente ocurren cuando existen aportes o salidas de agua (que no varían con el tiempo) a lo largo de todo el canal o en tramos del mismo; por ejemplo, los vertedores de canal lateral, las cunetas y bordillos en carreteras y los sistemas de drenaje en zonas de riego. El caso más común de flujo no permanente se presenta en los canales donde transita una onda de traslación o una avenida.

4.2.2. Flujo uniforme y variado.

Esta clasificación obedece a la utilización del espacio como un criterio.

El flujo uniforme se presenta cuando la velocidad media permanece constante en cualquier sección del canal. Con una superficie libre, esto implica que la sección transversal y el tirante permanecen, también constantes (fig 4.1). Como consecuencia de la definición, en flujo uniforme la pendiente S_f de la línea de energía de fricción, la pendiente S_a de la superficie libre del agua y la pendiente geométrica S_o del canal, son iguales: $S_f = S_a = S_o = S$. El hecho de que la velocidad media permanezca constante, se refiere estrictamente al hecho de que el flujo posea una velocidad constante en cada punto de la sección transversal a lo largo del canal; es decir, que la distribución de velocidades de cada sección no se altera. El tirante correspondiente al flujo uniforme se conoce como, tirante normal.

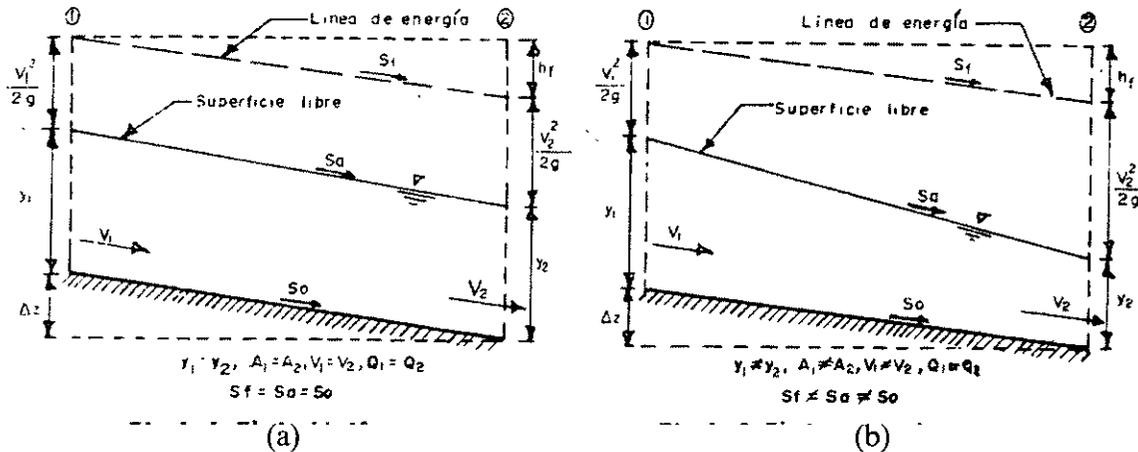


Figura 4.1.- (a) Flujo permanente uniforme. (b) Flujo permanente no uniforme.

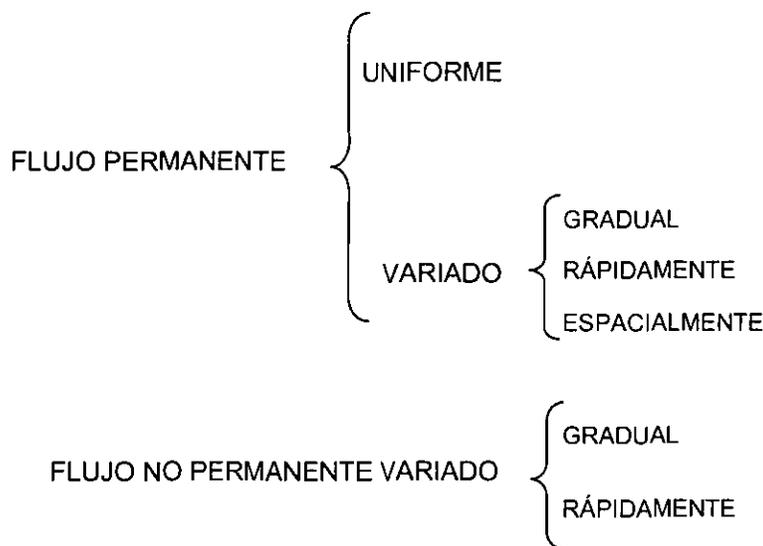
Las características de un flujo uniforme se pueden satisfacer únicamente si el canal es prismático, esto es, el flujo uniforme solo puede ocurrir en canales artificiales, pero no en los naturales. Si la velocidad se incrementa a valores muy grandes (más de 6.0 m/seg), se produce arrastre de aire adquiriendo el flujo un carácter no permanente y pulsatorio, por lo cual, un flujo muy rápido, no puede ser uniforme. Incidentalmente, a velocidades excepcionales (aproximadamente a 30 m/seg), el incremento del área hidráulica por el aire arrastrado llega a ser de hasta un 40%.

Teóricamente es posible que un flujo uniforme pueda ser permanente o no permanente. En el flujo uniforme permanente el tirante no cambia con el tiempo y es el tipo fundamental del

flujo más común en canales prismáticos. El flujo, uniforme no permanente requeriría que la superficie libre fluctuara de un instante a otro pero siempre permaneciendo paralela a la plantilla del canal, lo cual obviamente es difícil que ocurra en la práctica. Por lo mismo, el flujo, uniforme es casi siempre permanente.

El flujo es variado si la velocidad media cambia a lo largo del canal y, por lo mismo, posee características opuestas a las del flujo uniforme, tal como se muestra en la fig. 4.1(b). Los cambios de velocidad se pueden producir por una variación en la sección del canal, por un cambio en la pendiente o por una estructura hidráulica tal como un vertedor o compuerta interpuesta en la línea de flujo. Debido a estos efectos, el flujo uniforme es un estado ideal que difícilmente se logra. Sin embargo, en la mayoría de los casos, y sobre todo en canales rectos y largos de sección transversal y pendiente de plantilla constante, se alcanza un flujo casi uniforme, de tal manera que la suposición es razonable especialmente porque simplifica el análisis.

El flujo variado sí puede ser permanente y no permanente y supuesto que no existe flujo no permanente uniforme; el flujo no permanente tiene que ser necesariamente variado. El flujo variado se puede a su vez clasificar en gradual, rápida y espacialmente variado. El flujo gradualmente variado es aquel en que el tirante cambia en forma gradual a lo largo del canal. En el flujo rápidamente variado acontece lo contrario, como es el caso del salto hidráulico. En el flujo espacialmente variado cambian además las características hidráulicas a lo largo del canal o de un tramo del mismo,. En resumen, la clasificación es como sigue:



4.2.3. Flujo laminar y turbulento.

Los términos “*flujo laminar y flujo puramente viscoso*”, se usan como sinónimos para indicar que un fluido se desplaza en láminas o capas, en oposición al flujo turbulento en el cual las componentes de la velocidad tienen fluctuaciones al azar que se imponen sobre sus valores

medios (Fig. 4.3). Cuando se inserta una corriente de humo o tinta en un flujo laminar, trazará una línea delgada que está compuesta siempre de las mismas partículas de fluido. En flujo turbulento la línea de humo se confunde rápidamente y se mezcla con las partículas de fluido a medida que éste fluye, formando gran cantidad de nubes y filamentos que se van dispersando. Un ejemplo vivo de flujo laminar está en la miel espesa cuando se vierte de una botella.

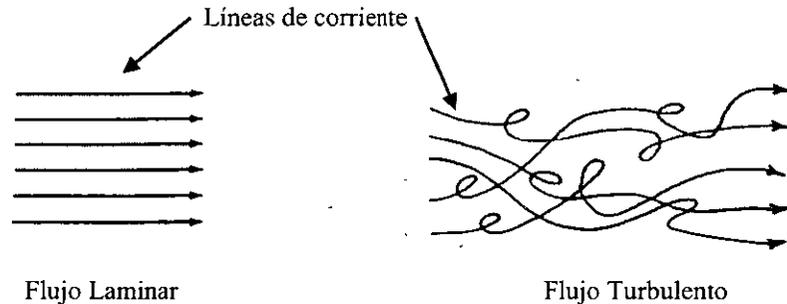


Fig.4.3. Flujos laminar y turbulento. Las líneas indican las trayectorias de las partículas.

¿Qué determina si un flujo es laminar o turbulento?

En un fluido dado, lo determina la velocidad y la configuración o tamaño del conducto. A medida que la velocidad aumenta el flujo cambiará de laminar a turbulento, pasando por un régimen de transición. Los dos tipos de flujo ocurren en la naturaleza, pero el turbulento es el más usual.

Se puede tener un ejemplo sencillo de dicha transición al observar el humo que se eleva de un cigarrillo. Durante una distancia, el humo asciende de una manera laminar. Después, de forma casi brusca, comienza a mezclarse, se convierte en turbulento y la columna de humo se extiende rápidamente y se diluye. La turbulencia ayuda en la difusión del humo y hace que se diluya en una corriente amplia y caótica, aún cuando el flujo general sea permanente. Esto se explica por el hecho de que solo se aprecian los valores medios de las velocidades en un intervalo grande.

Los efectos de viscosidad están siempre presentes en flujo turbulento, pero son superados generalmente por los esfuerzos cortantes turbulentos.

Tensión superficial. El término tensión superficial se usa ampliamente para identificar el esfuerzo aparente en la capa superficial de un líquido. Esta capa actúa como una membrana sometida a tracción y puede dar origen a una diferencia de presión a través de una superficie líquida curva (o sea una interfase aire-líquido). Realmente, la tensión superficial es una energía asociada con cualquier interfase de fluido-fluido, y la interfase aire-líquido es la más común. Como la superficie líquida actúa como una membrana, notamos por qué puede un líquido formar un menisco en un tubo capilar, y por qué las gotas de agua son más o menos esféricas.

El comportamiento del flujo en un canal está gobernado principalmente por los efectos de las fuerzas viscosas y de gravedad en relación con las fuerzas de inercia internas del flujo. La tensión superficial del agua sobre la superficie libre puede afectar el comportamiento del flujo en el caso de tirante o secciones transversales pequeñas, pero no juega un papel importante en la mayoría de los problemas de canales. En relación con el efecto de la viscosidad, el flujo puede ser laminar, de transición o turbulento en forma semejante al flujo en conductos con flujo a presión y la importancia de la fuerza viscosa se mide con el número de Reynolds definido en este caso como:

$$R_e = \frac{V R_h}{\nu}$$

donde:

R_h es el radio hidráulico de la sección, en m ; definido como la razón del área entre el perímetro mojado de la sección $R_h = A/P$.

V es la velocidad media en la sección, en m/seg .

ν es la viscosidad cinemática del agua, en m/seg^2 .

En los canales se han comprobado resultados semejantes a los de los tubos por lo que respecta a este criterio de clasificación. Para propósitos prácticos, en el caso de un canal se tiene:

Flujo laminar para $R_e < 400$ a 600

Flujo de transición para $400 < R_e < 2000$

Flujo turbulento para $Re > 2000$

Las discrepancias de estos valores de R_e respecto de los tubos es aparente, dado que para estos últimos R_e se define usando el diámetro D en lugar del radio hidráulico; en un tubo, se tiene que $D = 4 R_h$.

En la mayoría de los canales el flujo laminar ocurre muy raramente debido a las dimensiones relativamente grandes de los mismos y a la baja viscosidad cinemática del agua. La única ocurrencia de este flujo se presenta cuando escurre el agua en láminas muy delgadas sobre el terreno, como es el caso del flujo de agua de lluvia sobre cubiertas y superficies pavimentadas, donde el tirante es pequeño.

En el caso de canales naturales, la rugosidad de la frontera es normalmente tan grande, que ni siquiera ocurre el flujo de transición.

4.3. Geometría de las Secciones

El término sección normal de un canal usado en este libro se refiere a la sección considerada normal a la plantilla. Por el contrario, la sección vertical de un canal se toma sobre el plano vertical que pasa por el punto más bajo de la sección. Si el canal es prácticamente horizontal, ambos conceptos coinciden.

La sección de un canal natural es generalmente de forma muy irregular y variando constantemente de un lugar a otro los canales artificiales usualmente se diseñan con formas geométricas regulares siendo las más comunes la trapezoidal, la rectangular, la triangular y la circular. La parabólica se usa como una aproximación de secciones en canales naturales. En túneles que funcionan a superficie libre es frecuente encontrar la forma de herradura.

La selección de una forma determinada de sección de le del tipo de canal por construir, así la trapezoidal es muy común en canales no revestidos, la rectangular en canales revestidos con materiales estables: concreto, mampostería, madera, etc.

La triangular en canales pequeños y en las cunetas de carreteras y la circular en alcantarillas, colectores y túneles. Existen formas compuestas con las anteriores que encuentran utilidad en grandes alcantarillas y colectores y que permiten el paso del hombre a su interior. Los elementos geométricos más importantes de una sección son los siguientes:

Tirante.- Se puede interpretar de dos maneras distintas de acuerdo con el tipo de sección que se considera. El tirante normal (medido perpendicularmente a la dirección del flujo), es la altura de la sección transversal. Para una medición vertical, el tirante “*y*” es la distancia vertical del punto más bajo de la sección hasta lo superficie libre (fig. 4.2). Entre ambas, existe la siguiente relación:

$$d = y \cos \theta, \quad h = y \cos^2 \theta,$$

Donde θ es el ángulo de la plantilla del canal respecto de la horizontal. En la fig. 4.2, se pueden ver las relaciones geométricas, así como el ancho de la superficie libre *B*.

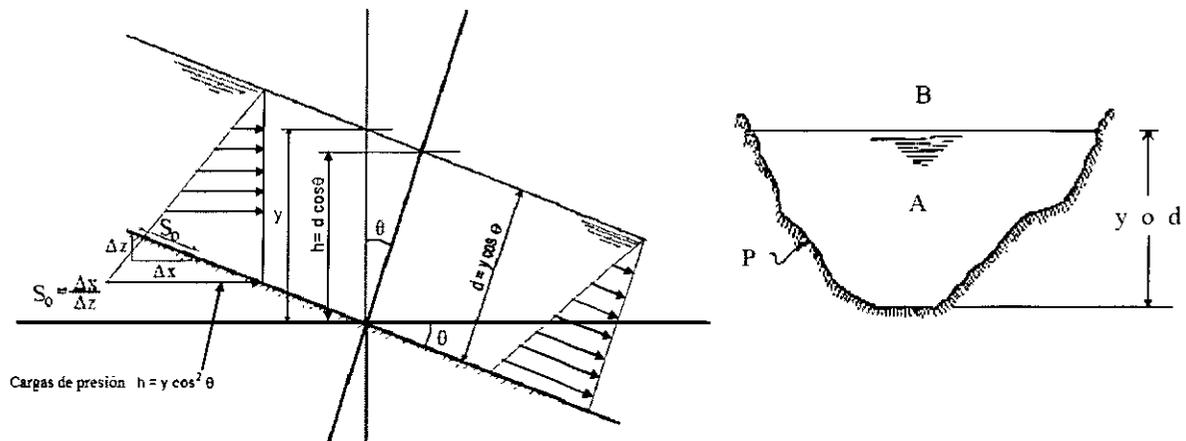


Figura 4.2.- Geometría de una sección hidráulica.

Se considera que un río o un canal tienen una pendiente grande cuando $\Delta z / \Delta x \geq 0.01$ o cuando $\theta \geq 6^\circ$. Como puede verse, si θ es cada vez menor a partir de 6° , el valor de $\cos \theta$ se aproxima más a la unidad, por lo que en canales con pendiente menor a 6° , se puede considerar que el tirante vertical “*y*” es igual al tirante “*d*” medido perpendicularmente a la superficie libre del agua y a la carga de presión.

Área hidráulica A .- Es el área de la sección (normal o vertical) ocupada por el líquido.

Perímetro mojado P .- es el perímetro de la sección (normal o vertical) en contacto con una frontera rígida, esto es, no incluye la superficie libre.

Radio hidráulico R_h .- de una sección (normal o vertical) es la relación del área hidráulica al perímetro mojado:

$$R_h = A/P$$

Tirante hidráulico.- Es la relación del área hidráulica al ancho de la superficie libre en cualquiera de las formas siguientes:

$$D = A_n/B_n \text{ para la sección perpendicular al fondo del canal.}$$

$$Y = A_v/B_v \text{ para la sección vertical respecto al fondo del canal.}$$

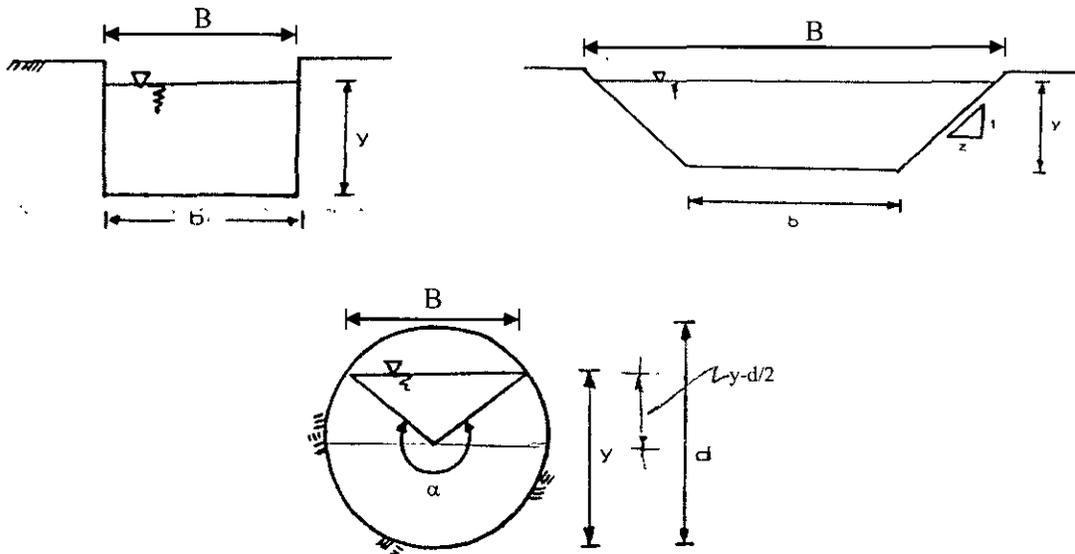


Figura 4.3.- Geometría de diferentes formas de la sección transversal de canales.

Cuadro 4.1. Fórmulas para calcular las características geométricas de diferentes secciones.

GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN	ÁREA HIDRÁULICA (A)	PERÍMETRO MOJADO (P)	ANCHO SUPERFICIE LIBRE (B)
RECTANGULAR	$b y$	$b + 2y$	b
TRAPEZIAL	$(b + 2y)y$	$b + 2y \sqrt{1 + z^2}$	$b + 2zy$
CIRCULAR ¹	$(\alpha - \text{sen } \alpha)d^2/8$	$\alpha d/2$	$2\sqrt{y(d - y)}$
¹ $\alpha = \pi + 2 \text{sen}^{-1}((d/2 - y)/(d/2))$			

4.4. Distribución de velocidades en la sección de un canal.

El agua escurre por los cauces debido a que es arrastrada por su peso bajo el efecto de la fuerza de *fuerza de gravedad*. Esto provoca el escurrimiento por laderas y cauces del mismo modo que lo hace un cuerpo al resbalar por un plano inclinado. Galileo descubrió que, si no hubiese fricción, este movimiento sería uniformemente acelerado. Lo mismo acontecería con las corrientes, si no fuese por la *resistencia* que oponen al roce directo del agua con el terreno y el choque con obstáculos, locales, como piedras o vegetación. De hecho, la velocidad de las corrientes naturales, aceleradas por la gravedad y frenadas por la fricción, suele alcanzar cierta regularidad en tramos de ríos o canales poco más o menos rectilíneos y de ancho y pendiente (en sentido longitudinal) invariables. Si la velocidad que allí se alcanza es casi constante, se suele decir que se ha conseguido un *movimiento uniforme*.

Además de la pendiente, la velocidad es afectada por las *resistencias pasivas*, que resultan de:

- a) la naturaleza del lecho y eventual vegetación sumergida
- b) ensanchamientos y contracciones del cauce
- c) levantamiento o profundización del fondo
- d) curvas y otros cambios de dirección
- e) pilas de puente y otros obstáculos

Por lo general, la influencia de la pendiente longitudinal del cauce sobre la velocidad resulta tanto más considerable cuanto más reducidas son las resistencias pasivas. Si se compara, por ejemplo, un río ancho y profundo, en el cual la resistencia ofrecida por el lecho afecta sólo a una parte pequeña de la gran masa de agua en movimiento, con un riachuelo angosto e irregular, vemos que □con igual pendiente□ la velocidad en este último es siempre menor que en el primero.

Esta consideración sirve también para explicar un hecho importante: que la velocidad de un río durante las avenidas es siempre mayor que en estiaje; porque en estiaje, el cuerpo de agua que escurre es de poca profundidad y, por tanto, más sensible a las irregularidades del lecho.

Lo anterior se debe a que la resistencia del cauce afecta más a esa parte de la corriente que le queda más cerca. Por tanto es un error imaginar que el agua avance en bloque, como si fuese una masa de hielo; de un punto a otro de una misma sección transversal, las velocidades varían, siendo mayores en la zona central. Esto, cuando el cauce es recto; porque alteraciones todavía más extrañas se notan en las curvas.

La presencia de la superficie libre y de curvas a lo largo de un canal, la forma de la sección, la rugosidad superficial, el gasto y la acción de corrientes secundarias en el plano de la sección transversal afectan la distribución de velocidades en la sección de un canal. La fig 4.4 ilustra el aspecto general de la distribución de velocidades en la sección transversal típica de un río natural. Dicha distribución se presenta con base en las curvas que unen puntos de igual velocidad. Estas curvas normalmente se interpolan a partir de los datos de mediciones con molinetes, obtenidas en diferentes puntos de la sección transversal.

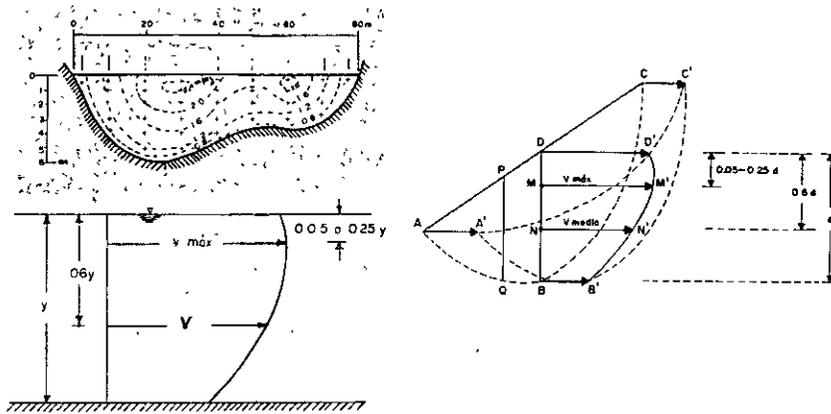


Figura 4.4.- Distribución de velocidades en la sección transversal de canales.

En la fig. 4.4 se observa que la velocidad mínima ocurre en la proximidad de la pared y que existe un incremento de la velocidad hacia la superficie libre.

El punto de velocidad máxima, queda ligeramente debajo de la superficie libre, lo cual se atribuye al movimiento circulatorio secundario inducido por la proximidad de los lados. Por ello podría considerarse que en canales anchos y de poco tirante, la velocidad máxima se localiza al nivel de la superficie libre.

En la fig. 4.4 se observa que la zona donde ocurre la máxima velocidad se localiza prácticamente sobre la vertical que tiene mayor profundidad y a una distancia de 0.05 a 0.25 del tirante desde la superficie libre hacia abajo. También se ilustra la forma de la distribución sobre una vertical y se observa que la velocidad media se localiza a una profundidad aproximada de 0.6 del tirante y es aproximadamente el promedio de la velocidad a 0.2 y 0.8 del tirante o bien entre 0.8 y 0.94 de la velocidad superficial. En un canal ancho, con gran velocidad y poco tirante o bien en un canal liso, la velocidad máxima se puede encontrar con frecuencia sobre la superficie libre. La rugosidad de un canal aumenta la curvatura de la distribución de velocidades sobre una vertical y la máxima se presente debajo de la superficie libre. Asimismo, en el plano horizontal, una curva aumenta bastante la velocidad en el lado exterior por la acción de la fuerza centrífuga.

En canales muy anchos la distribución de velocidades en la región centro de la sección es prácticamente la misma que la que ocurre en un canal rectangular de ancho infinito, esto es, los bordos del canal prácticamente no afectan al flujo y si el ancho del canal es mayor, de 4 a 10 veces el tirante; el canal se puede considerar como un flujo de tipo bidimensional. El método de aforo en un canal se explica a continuación.

4.5. Principios básicos del flujo de fluidos aplicado para la medición de caudales.

Principio de Continuidad

Se ha supuesto que el agua es incompresible, y por lo tanto, el volumen que atraviesa una sección transversal debe ser el mismo que pasa por otra sección aguas abajo, en la unidad de tiempo.

Si se supone también que el flujo es permanente, entonces el volumen no cambia con el tiempo. Por lo tanto, la rapidez con que pasa un volumen de agua a través de una sección es igual al producto de la velocidad en la dirección perpendicular a la sección transversal por el área de ésta. Si este principio se aplica entre dos secciones (identificadas por los subíndices 1 y 2), de un canal, este principio se expresa como sigue:

$$\text{Caudal} = Q = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Principio de conservación de la energía.

Aplicando la ecuación de Bernoulli (conservación de la energía), entre dos secciones de un cauce (1 y 2), se tiene lo siguiente:

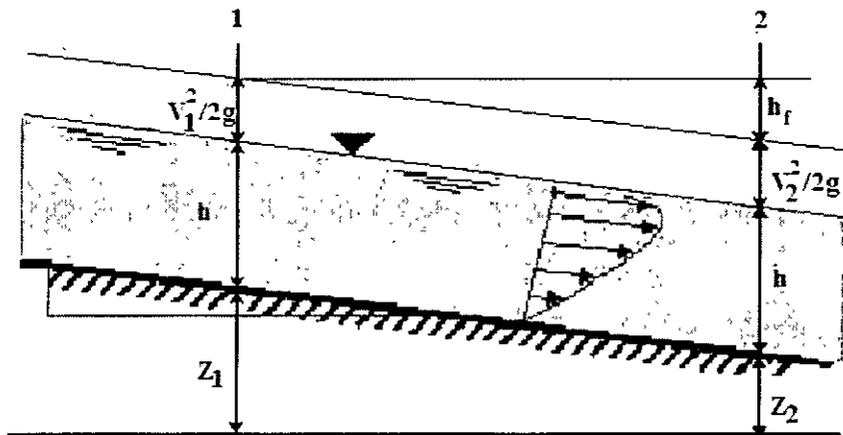


Figura 4.5.- Aplicación de la ecuación de Bernoulli entre dos secciones de un canal.

$$Z_1 + h_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + h_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} \quad (4.1)$$

A la ecuación anterior se le conoce como ecuación de la energía específica, debido a que establece la transformación de la energía mecánica del líquido por unidad de peso del mismo. Como resultado de la distribución no uniforme de las velocidades de un canal, se ha determinado experimentalmente que el coeficiente α varía entre 1.03 y 1.36 y, para fines prácticos se asume igual a la unidad.

Z es la carga de posición o **energía potencial**, en metros columna de agua (m.c.a.).

h es la carga de presión que corresponde al *trabajo mecánico* realizado por las fuerzas debidas a la presión, en m.c.a.

$\frac{V^2}{2g}$ es la carga de velocidad, es la energía cinética de toda la vena líquida, en m.c.a.

h_f es la pérdida de energía debida a la fricción del fluido al moverse entre dos secciones, en m.c.a.

Como se definió que el caudal $Q = VA$, entonces la velocidad se puede expresar como

$$V = Q/A$$

De donde se obtiene:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (4.2)$$

$$V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2 \quad (4.3)$$

Sustituyendo la ecuación (4.3) en la ecuación (4.1), se obtiene lo siguiente:

$$Z_1 - Z_2 + h_1 - h_2 - h_f = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{A_2}{A_1} \frac{V_2^2}{2g}$$

Si se hace $Z_1 - Z_2 + h_1 - h_2 = \Delta y$, y factorizando la carga de velocidad como $\frac{V_2^2}{2g} \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)$

Al despejar V_2 , se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g (\Delta y - h_f)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (4.4)$$

Con la ecuación (4.4), en forma aproximada se puede calcular el caudal como $Q = V_2 A_2$, a partir de la medición de los tirantes, elevaciones y cargas en las secciones 1 y 2, para un flujo uniforme.

Para medir la velocidad en un punto en el interior de un líquido en movimiento, se puede utilizar el tubo de Pitot en combinación con un piezómetro, para obtener la carga de velocidad en dicho punto. El tubo de Pitot sumergido en el interior de un flujo mide la carga de presión más la carga de velocidad y el piezómetro mide solamente la carga de presión, por lo cual la diferencia en la elevación del agua entre el tubo de Pitot y el piezómetro será igual a la carga de velocidad $V^2/2g$, de donde se obtiene:

$$V = \sqrt{2g \Delta h} \quad (4.5)$$

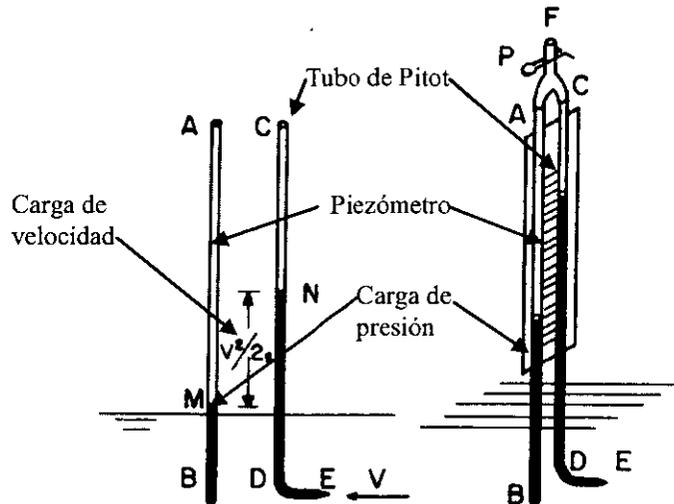


Figura 4.6.- Tubo de Pitot combinado con un piezómetro para medir la carga de velocidad.

Molinete y rotámetro

Otro dispositivo para medir la velocidad del agua en conductos de grandes dimensiones es el molinete hidráulico, que consta de una hélice pequeña conectada a un cuerpo fuselado. Éste, a su vez, queda sujeto a una barra graduada para saber la profundidad del punto en que se desea hacer la medición (Fig. 4.7).

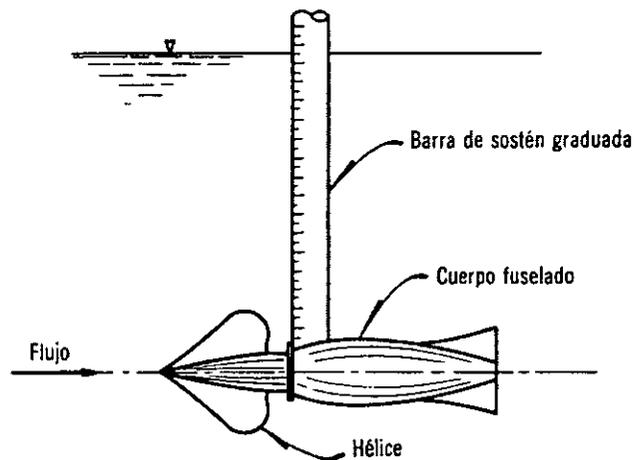


Figura 4.7.- Molinete Hidráulico.

Al producirse la rotación de la hélice el dispositivo eléctrico contenido en el cuerpo fuselado envía una serie de señales: luminosas a una lámpara o acústicas a un audífono.

El molinete se calibra previamente en un canal de aguas tranquilas de manera que se tenga una curva que relacione el número de impulsos registrados, con la velocidad del flujo. Este

dispositivo es de gran utilidad para el aforo en conductos forzados de gran diámetro o en corrientes naturales. Del conocimiento de la distribución de velocidades en la sección, se puede determinar la velocidad media del flujo.

Energía específica y régimen crítico

La ecuación de la energía permite resolver con relativa sencillez aquellos problemas de flujo a superficie libre en que se conoce el tirante de las dos secciones extremas del tramo en que se aplica. Este problema es, en esencia, similar al del cálculo del gasto en un tubo a partir de las presiones aguas arriba y en el estrangulamiento de un venturímetro.

Cuando se tiene un cambio de área en un tubo a presión, la ecuación de continuidad permite determinar el cambio en la velocidad y carga de velocidad y de ella el cambio de presión; sin embargo, el mismo problema en un canal se torna más complicado; cuando se desconoce el tirante en alguna de las secciones y tiene que ser calculado a partir de los cambios en la sección transversal, ello conduce a dificultades especiales de mucho interés debido a que el tirante juega un doble papel al influir en las ecuaciones de energía y continuidad simultáneamente. Para mejor aclaración de lo expuesto, se presenta el siguiente problema.

Problema.- La constricción en el canal rectangular mostrado en la fig 4.8 es suficientemente gradual y lisa como para despreciar la pérdida de energía; en ella no existe cambio en el ancho de la plantilla, sino únicamente en su nivel. Conocidas las condiciones en la sección 1 determinar las de la sección 2.

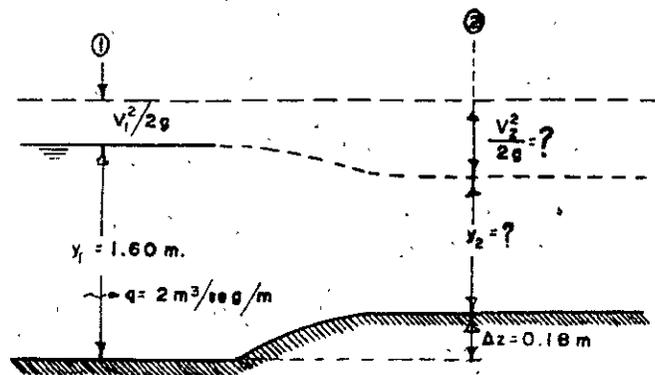


Figura 4.8.- Canal con elevación de la plantilla.

Solución.

Siendo el gasto por unidad de ancho $q = 2 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$ y $y_1 = 1.60 \text{ m}$, la velocidad y la carga de velocidad serán:

$$V_1 = \frac{q}{y_1} = \frac{2.6}{1.6} = 1.25 \text{ m/seg}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{(1.25)^2}{19.62} = 0.08 \text{ m}$$

De la ecuación de la energía o de Bernoulli entre las secciones 1 y 2, resulta:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \Delta z = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

sustituyendo valores se obtiene:

$$1.60 + 0.08 + 0.18 = 1.50 \text{ m} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Sustituyendo $V_2 = q/y_2 = 2/y_2$, en la ecuación anterior, se obtiene lo siguiente:

$$y_2 + \frac{4}{2g y_2^2} = 1.5$$

De donde se obtiene:

$$y_2^3 - 1.5y_2^2 + 0.204 = 0$$

Del análisis de esta ecuación se deduce que existen tres valores de y_2 dos de ellos positivos y uno negativo que la satisfacen. Dichos valores son: 1.395m, 0.439m y -0.334 m. Desde el punto de vista matemático, cualquiera de los tres resolverían el problema; sin embargo, físicamente debe existir un solo tirante en la sección 2 que satisfaga las condiciones de la sección aguas arriba. Surge entonces el problema de elegir el tirante correcto de los tres que existen; esto es, la necesidad de un estudio especial de la ecuación de energía que proporcione la solución adecuada y que es el propósito principal de este capítulo.

La energía específica en la sección de un canal se define como la energía por kilogramo de agua que fluye a través de la sección medida con respecto al fondo del canal. Por lo tanto, la energía específica vale:

$$E = y \cos^2 \theta + \frac{V^2}{2g} \quad (4.6)$$

Para canales de pendiente pequeña y sustituyendo $V = Q/A$, la energía específica se expresa como:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2g A^2} \quad (4.7)$$

Suponiendo que Q es constante y A es función del tirante, la energía específica es función únicamente del tirante. En la fig 4.9 se presenta gráficamente la ecuación (4.7), a través de una curva que tiene dos ramas. En el caso de θ pequeño, la rama AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal y la rama BC a la línea OD que pasa por el origen y tiene una inclinación de 45° . Si θ es grande, se satisfacen las mismas condiciones anteriores con la única diferencia que la línea OD no tiene la inclinación de 45° . En cualquier punto P sobre la curva, la abscisa representa la energía específica en la sección y que corresponde al tirante y representado por la

abscisa del punto P. Existe una tercera rama de la curva (indicada con línea de puntos) que representa las soluciones negativas sin interés práctico.

La curva muestra que para una determinada energía específica existen dos valores del tirante: y_1, y_2 que reciben el nombre de tirantes alternados el alternado menor y_1 y el mayor y_2 . En el punto C, la energía específica es la mínima con la cual puede pasar el gasto Q a través de la sección y para la cual existe un solo valor del tirante, que recibe el nombre de tirante crítico y al cual corresponde una velocidad llamada crítica. El estado del flujo que se desarrolla con el tirante crítico recibe el nombre de estado o régimen crítico.

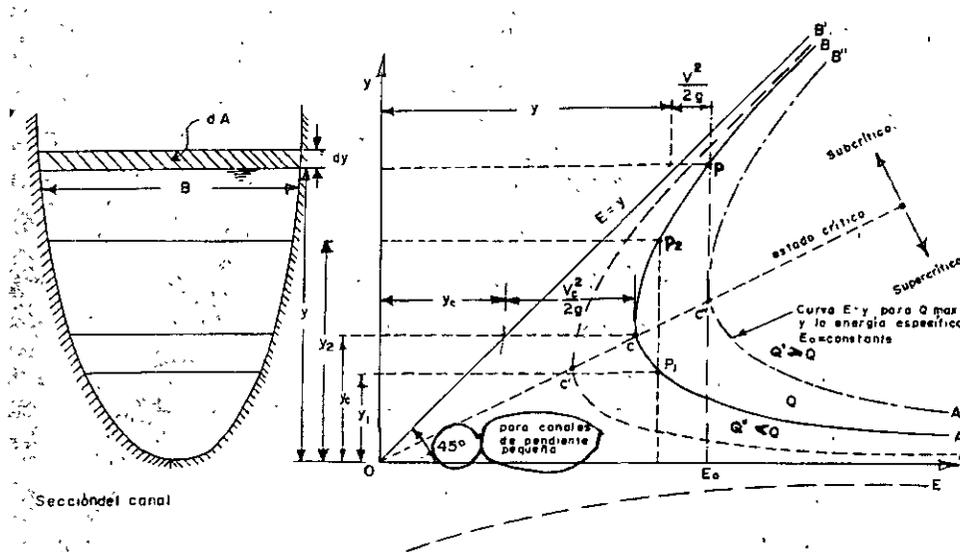


Figura 4.9.- Curvas de energía específica.

Cuando el tirante es mayor que el crítico, la velocidad es menor que la crítica para el gasto dado; y en estas condiciones, el flujo se encuentra en estado o régimen subcrítico. Cuando el tirante es menor que el crítico, la velocidad es mayor que la crítica y el flujo se encuentra en estado o régimen supercrítico. En cada régimen, el tirante y la velocidad adquieren el nombre que corresponda (subcríticos o supercríticos).

Si el gasto cambia a otro valor y se mantiene de todos modos constante, la curva de energía específica cambia a las posiciones A'B' y A''B'', según que el gasto sea menor o mayor, respectivamente, que el gasto usado para la construcción de la curva AB.

También se observa que al elegir una energía específica E_0 constante, el punto C'' indica la última curva E-y que quedaría intersectada por la vertical de abscisa E_0 . Puesto que el gasto Q correspondiente a cada curva E-y crece a medida que estas se desplazan a la derecha, el punto C'' señalará la curva E-y de gasto $Q_{máx}$ que fluiría con la energía específica E_0 .

Con la curva de energía específica para el canal del problema anterior, es posible aclarar los conceptos antes indicados. La fig 4.10a muestra nuevamente la constricción y la 4.10b la curva de energía específica correspondiente. Suponiendo que el flujo aguas arriba del escalón (sección 1) tiene una energía específica E_1 mayor que la mínima, las condiciones del flujo

quedan representadas por el punto A sobre la rama superior de la curva $E-y$ de la fig 4.10b, calculada para el gasto unitario q constante. Debido a que no existe cambio en el ancho del canal, q no varía y el punto que representa las condiciones del flujo en la sección 2 debe quedar sobre la misma curva en que se encuentra A.

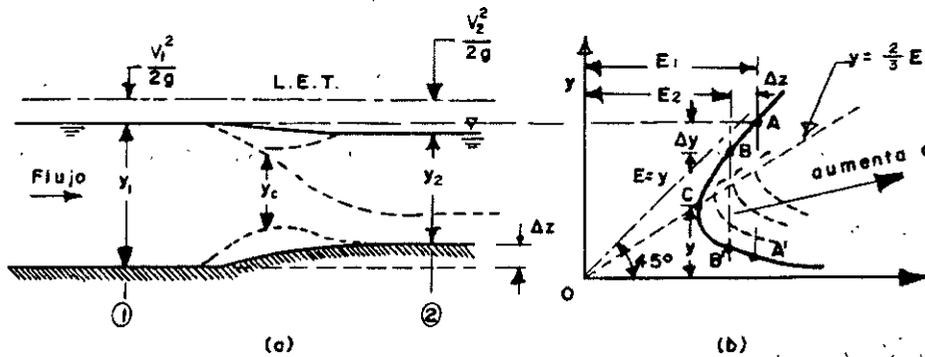


Figura 4.10.- Uso de la curva de energía específica en la transición del problema.

Siendo la energía específica en la sección 2: $E_2 = E_1 - \Delta z$, las soluciones posibles quedarán representadas por los puntos de intersección de la línea $E = E_2$ con la curva $E - y$. Los puntos B y B' proporcionan dos soluciones físicamente posibles que también se aplicarían al caso en que el flujo en la sección 1 quedara representado por el punto A el cual tiene la misma energía específica que el A. Queda por resolver el problema de elegir la solución correcta de las dos reales posibles teniendo como guía valiosa la forma de la curva $E - y$.

Para encontrar la solución correcta, es necesario elegir el camino adecuado para pasar de A a alguno de los puntos B o B'. Si se pasara de A a B a lo largo de la curva $E - y$ y después de B a B' sobre la vertical, esto implicaría que el gasto q iría cambiando a lo largo de la transición y, como consecuencia, el ancho del canal en forma simultánea. Este cambio en el ancho tomaría la forma de una contracción seguida por una expansión como se muestra en las figs 4.11a y b, donde se ha eliminado el escalón para mayor claridad.

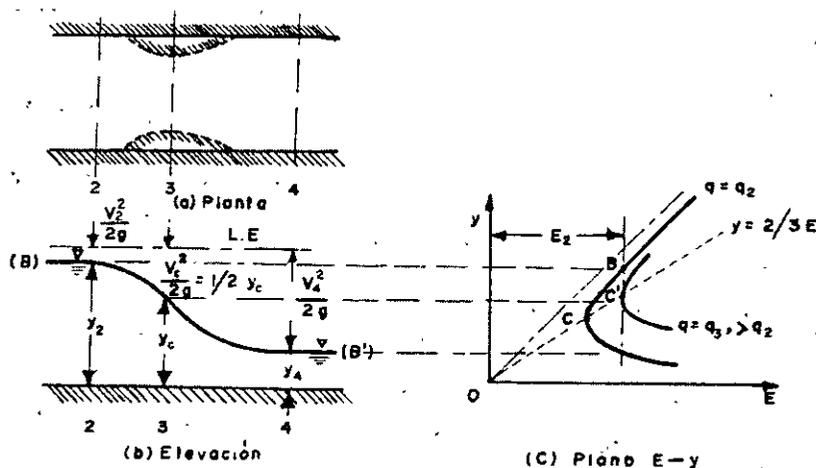


Figura 4.11.- Cambio de régimen al cambiar el ancho del canal.

Debido a que el ancho permanece constante, el único camino posible de B a B' sería sobre la curva E-y de la fig 4.10b; sin embargo siguiendo dicho camino, la energía específica tendría que disminuir por debajo de E_2 y después aumentar hasta este valor. Esto podría acontecer si el nivel de la plantilla se elevara temporalmente, por encima del nivel del escalón, lo suficiente para llegar hasta C, formar el tirante crítico, y después regresar al nivel del escalón como se muestra en la fig 4.10a.

Se concluye que si el ancho del canal no varía y la plantilla no se eleva por arriba del nivel del escalón, el punto B' es inaccesible si el flujo aguas arriba está representado por el punto A. Por un razonamiento análogo se concluye que el punto B es inaccesible si el flujo aguas arriba está representado por el punto A'. El salto de la rama superior a la inferior o viceversa es posible únicamente en el caso de que exista una reducción local, tanto en el ancho como en el nivel de plantilla, dentro de la zona del escalón.

Se observa que para ir de A a B el tirante disminuye, por tanto, la velocidad y carga de velocidad deben aumentar. Debido a que la línea de energía permanece al mismo nivel, la superficie del agua debe descender sobre el escalón (fig 4.10a). Esta es una conclusión sorprendente toda vez que sería de esperarse una elevación del nivel del agua por la presencia del escalón. Por el contrario, el movimiento de A' a B' se acompaña de un incremento en el tirante y un ascenso de la superficie libre.

En el caso específico del problema, es evidente que el régimen en la sección 1 es subcrítico con energía específica de valor:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 1.60 + 0.08 = 1.68$$

En efecto, para esta energía específica otro valor del tirante que la satisface (para el mismo gasto unitario $q = 2 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$) vale $y_1 = 0.398 \text{ m}$ esto significa que el punto A de la fig 4.10b representa las condiciones para $y_1 = 1.60 \text{ m}$ y el punto A' las condiciones para $y_1 = 0.398 \text{ m}$ siendo el primer punto la condición real del flujo en la sección 1. El punto B corresponderá entonces a las condiciones de la sección 2.

En el caso de que y_1 fuese 0.398 m , el punto A' representaría las condiciones del flujo en la sección 1 y el B' las de la sección 2.

De acuerdo con los planteamientos hechos, si Δz es suficientemente grande para hacer que E_2 sea menor que la energía específica mínima (representada por el punto C), no existe solución posible, esto es, los tres valores prescritos de q , E , y Δz no pueden existir simultáneamente en el canal. En esto no hay novedad alguna; en efecto, al observar la curva de energía específica se concluye que si Δz es muy grande, el gasto q no podrá pasar con la energía específica disponible. Para lograrlo se formará una onda que se trasladará hacia aguas arriba estableciendo un nuevo estado permanente forzando a que q disminuya o que E_1 aumente.

La altura máxima posible en el escalón que evita modificaciones del flujo hacia aguas arriba, es igual a la diferencia entre la energía específica aguas arriba y la mínima posible (correspondiente al estado crítico). Es importante notar que cuando la altura del escalón corresponde a la crítica y es de corta longitud como en la fig 4.12, el régimen aguas abajo puede ser supercrítico o subcrítico, dependiendo de las condiciones ahí impuestas. De la fig 4.10 se observa que si el punto que representa al flujo se mueve de A a C, después queda libre de volver a la rama de régimen subcrítico de la curva o de continuar hacia la de supercrítico, según sean las condiciones de aguas abajo. Si hay algún control del lado aguas abajo, la tendencia será hacia el régimen subcrítico; de lo contrario, hacia el supercrítico. La convergencia del flujo hacia el escalón produce un efecto similar después del mismo, tal como se observa en la fig 4.12. Al observar que el mismo principio opera cuando el régimen de aguas arriba es supercrítico, se concluye que cualquiera de los regímenes de flujo del lado aguas arriba puede pasar a cualquiera de los del lado aguas abajo.

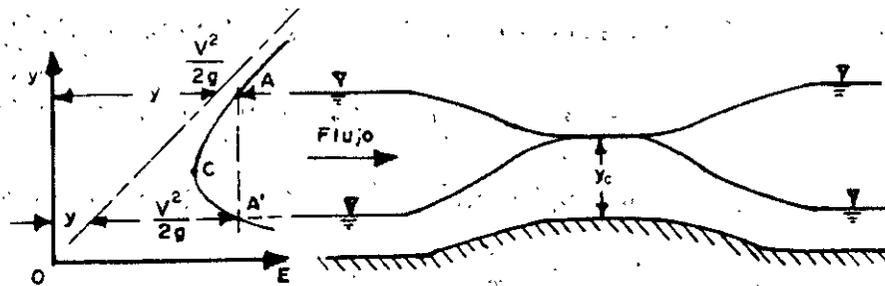


Figura 4.12.- Efecto de un escalón corto ascendente y de altura crítica.

Consideraciones semejantes se aplican en el caso de una reducción en el ancho dónde la condición crítica se traza sobre el plano $E - y$, como se muestra en la fig 3.6; una línea vertical dibujada desde el punto A de aguas arriba, toca en la cresta C' a una curva interior de gc ; esto q superior. El valor de q de esta curva proporciona el ancho mínimo de la contracción. Nuevamente el flujo aguas abajo puede ser supercrítico o subcrítico.

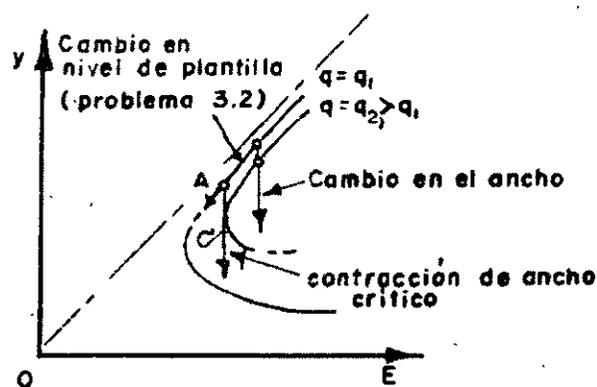


Figura 4.13.- Cambio en el ancho y nivel de plantilla trazados sobre la curva $E-y$.

El problema antes presentado desde luego se puede generalizar también a canales no rectangulares y es de gran interés práctico. A menudo acontece que una contracción local debe introducirse en un canal, por ejemplo para reducir el costo de un puente cuando pasa debajo de un camino o bien para pasar de un canal trapecial a una alcantarilla de sección circular debajo de un camino. Resulta entonces esencial conocer cuál debe ser la magnitud tolerable de la contracción para que no haya influencia en las condiciones de aguas arriba. El problema consiste en encontrar la sección más pequeña que sea capaz de sostener el mismo gasto para una energía específica dada. Dicha sección será aquella que opere en estado crítico.

Una contracción que influya severamente en el flujo de aguas arriba se convierte en un tipo especial de control y se conoce como "estrangulamiento" y el verbo "estrangular" describe la acción de la contracción.

Régimen Crítico

Condición de estado crítico (Gasto constante)

En las discusiones del subcapítulo anterior se ha demostrado que hay dos posibles tirantes de flujo para cada combinación de valores de la energía específica y del gasto y que la transición de un tirante a otro puede ocurrir únicamente bajo ciertas condiciones especiales. Estos dos tirantes (representados por las dos ramas de la curva E-y, separados por la cresta C) son característicos de dos tipos diferentes de flujo. Un camino lógico para explorar la diferencia entre ellos sería el discutir primero el flujo representado por el punto C que se encuentra en la condición crítica entre los dos regímenes alternativos. La palabra "crítico" se usa para describir este estado de flujo y puede definirse como aquel para el cual la energía específica es la mínima con que puede fluir un gasto Q dado a través de la sección de un canal de forma especificada.

Las propiedades analíticas del régimen crítico se pueden derivar atendiendo a la definición antes dada. Para un gasto constante, la derivada con respecto a y de la ec (4.7) es:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{g A^3} \frac{dA}{dy}$$

El elemento de área dA cerca de la superficie libre (fig 4.9) es igual a Bdy i por lo tanto, con $B = dA/dy$, la ecuación anterior queda como sigue:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2 B}{g A^3} = 1 - \frac{V^2}{g A/B} \quad (4.8)$$

Haciendo $A/B = Y$ (tirante hidráulico de la sección, que en el caso de la sección rectangular, coincide con el verdadero tirante), la ecuación anterior se transforma a:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - F_r^2 \quad (4.9)$$

donde $F_r = V/\sqrt{gY}$ representa el número de Froude de la sección del canal, calculado considerando el tirante hidráulico Y como longitud característica. Puesto que el estado crítico

se produce para la energía específica mínima, por el criterio de la primera derivada ($dE/dy = 0$), de la ec (4.9) se obtiene:

$$F_{rc} = \frac{V_c}{\sqrt{g Y_c}} = \frac{Q}{A_c \sqrt{g Y_c}} = 1 \quad (4.10)$$

o bien:

$$F_{rc} = \frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} \quad (4.11)$$

Las ecs (4.10 y 4.11) imponen las condiciones del estado crítico en un canal de forma cualquiera y permiten calcular el tirante crítico. La primera ecuación indica que el número de Froude para el estado crítico vale 1. La segunda presenta una clara relación entre las condiciones de gasto en la sección contra elementos geométricos de la misma, éstos dependientes únicamente del tirante. Aquí conviene aclarar que si el canal es de gran pendiente, para calcular A_c y B_c en la ec (4.11), es suficiente utilizar $d_c \cos \theta$ en lugar de y_c (d_c es el tirante crítico normal a la plantilla).

Condición para gasto máximo (E_o constante)

Consideremos ahora el problema que se plantearía al suponer una energía específica E_o constante en la fig 4.9 y de encontrar cuál sería la magnitud $Q_{\text{máx}}$ del gasto que podría fluir a través de la sección con dicha energía. Dicha situación quedaría representada por el punto C" que es el punto de intersección entre la vertical de abscisa E_o y la curva E - y correspondiente al gasto $Q_{\text{máx}}$.

La ec (4.7) también se puede escribir en la forma siguiente:

$$Q = \sqrt{2g} A(E_o - y)^{1/2}$$

En esta ecuación se observa que para $y = 0$ $Q = 0$ y para $y = E_o$, $Q = 0$ y entre estos dos valores existe un máximo para Q . La gráfica Q - y mostrada en la fig 4.14 representa el lugar geométrico de la ec 4.7. Se observa que existen dos valores de y para cada valor de Q , excepto en el máximo.

Resumiendo, de la ecuación anterior resulta:

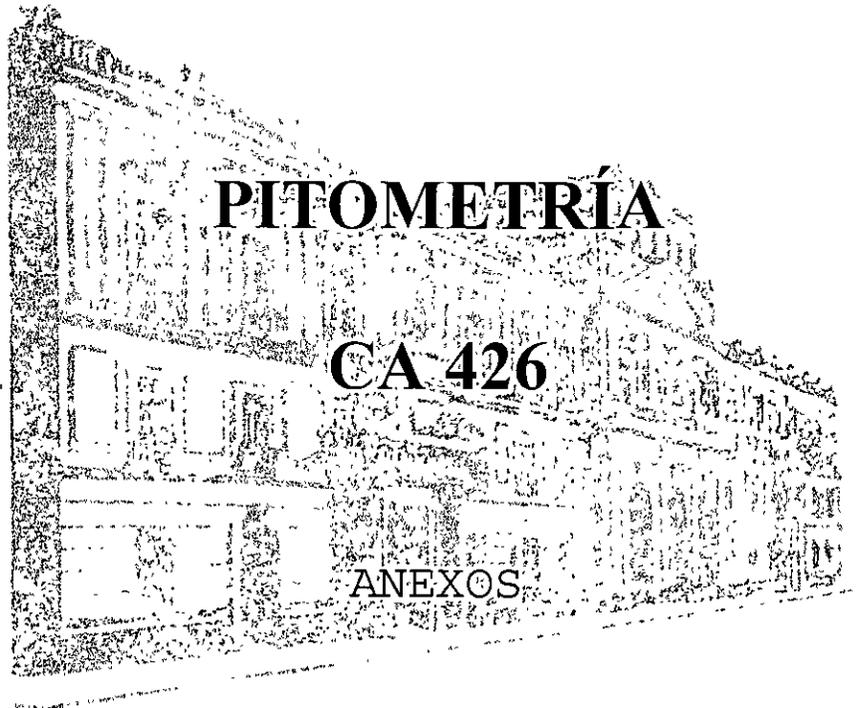
$$\frac{Q_{\text{máx}}^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} \quad (4.12)$$



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**



**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

CONTENIDO

	Página
¿PARA QUIÉN Y POR QUÉ? Y EVALÚA SI SABES	1
1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y DESCRIPCION DE COMPONENTES	2
2. REQUERIMIENTOS DE INSTALACION FISICA	7
3. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE INSTALACION	12
4. PRUEBAS DE PRECISIÓN Y CALIBRACIÓN	14
5. REGISTRO DE LECTURAS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION	16
6. MANTENIMIENTO BASICO	18
7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS	19
8. LISTADO DE PRINCIPALES PROVEEDORES	22

1. PARA QUIÉN Y POR QUÉ? EVALÚA SI SABES

¿ PARA QUIÉN?

Antes de decir para quién está dirigido este Manual, es conveniente mencionar que el medidor de gasto de efecto doppler representa una nueva generación de medidores cuyas características principales son el uso de varios "medidores" en uno solo y el manejo de la información en archivos de computadora.

Por lo tanto el Manual se dirige a todas las personas relacionadas con la medición del agua en canales, específicamente, personal de la Comisión Nacional del Agua, que tengan la necesidad de medir en sitios en los que los medidores convencionales (molinete, flotador, aforador, etc.) no se puedan usar, o bien en aquellos sitios donde se tenga que medir durante periodos largos con medición constante (por ejemplo, cada 5 minutos, durante 15 días) o eventualmente, cuando se requiera enviar la información por transmisión remota.

¿ POR QUÉ?

Como se mencionó, este tipo de medidores no son convencionales y esto hace que no se conozca mucho sobre su funcionamiento y uso.

El presente Manual pretende ilustrar a los usuarios del medidor de efecto doppler tanto en su funcionamiento como en su mejor forma de utilización, con objeto de sacar el mayor provecho del potencial que representan las innovaciones tecnológicas del dispositivo.

EVALÚA SI SABES

- ¿Qué es el efecto doppler?
- ¿Son grandes los medidores de efecto doppler?
- ¿Qué conocimientos previos debe tener una persona para manejar el medidor?
- ¿Es muy utilizado el medidor de efecto doppler?
- ¿Qué tan caro es el medidor?

1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

El funcionamiento del medidor de efecto doppler es un proceso bastante complicado. El medidor calcula el gasto en función de dos variables principales: el área hidráulica y la velocidad media. Sin embargo, cada una de esas variables tampoco se miden directamente; más bien, se miden otras variables físicas. El proceso completo se observa en la figura 1.2. En este esquema las flechas representan fórmulas que se aplican para obtener cada variable subsecuente. Esto significa que el medidor de efecto doppler mide únicamente las variables que están en la parte superior del esquema; es decir el efecto doppler (que se explicará más adelante), la temperatura y el voltaje de una corriente eléctrica.

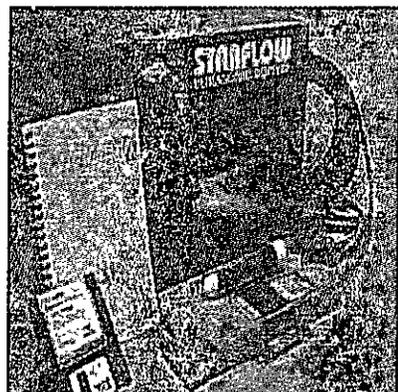


Figura 1.1: Medidor de efecto Doppler de la marca Unidata.

El hecho de registrar el área hidráulica, la velocidad y la temperatura, al mismo tiempo, es una característica que hace que

este tipo de medidores representen una nueva generación, ya que todos los aparatos de medición anteriores no lo hacen (flotador, molinete, medición volumétrica, aforador de garganta – parshall, garganta suprimida, garganta larga, etc., métodos de dilución, etc.). A continuación se explica cómo el medidor de gasto de efecto doppler mide cada una de ellas.

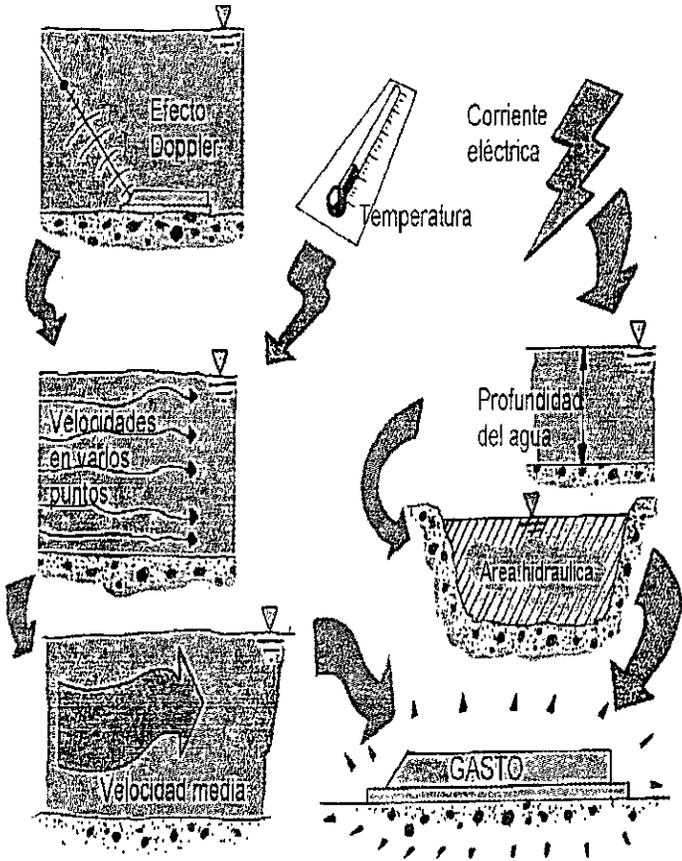
1.1 MEDICIÓN DEL ÁREA HIDRÁULICA

El medidor de efecto doppler calcula el área hidráulica en función del tipo de sección y de la profundidad de agua.

Para medir la profundidad se utiliza un transductor. Un transductor es un dispositivo que proporciona una salida eléctrica en respuesta a una magnitud física que se desea medir. Para este caso se desea medir la profundidad del agua y lo que realmente se mide es la presión.

Esto tiene su explicación en el hecho de que mientras más profundidad se tenga, mayor presión se presentará. Esto se explica a continuación: el agua ejerce una presión sobre un material especial sujeto a una corriente eléctrica; dicho material puede ser silicio incorporado a un diafragma. Cuando el diafragma está plano (sin presión) presenta cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica, y cuando

Figura 1.2: En realidad lo que el aparato mide es lo que se encuentra en la parte alta de la figura: el efecto doppler, la temperatura y LA diferencia de voltaje de una corriente eléctrica.



está deformado presenta otra (ver figura 1.3). Esta diferencia de resistencia (medida en voltaje) es la que registra el dispositivo y la transforma, por medio de fórmulas, primero a presión y después a profundidad de agua.

Después que se tiene la profundidad del agua se puede calcular el área hidráulica. Para el caso de secciones geométricas sencillas como el rectángulo o el trapecio las fórmulas son muy simples.

Tipo de sección	Fórmula
Rectángulo	$A=BY$
Trapecio	$A=BY+KY^2$

En las fórmulas anteriores A es el área hidráulica; B es el ancho de la parte inferior del canal (normalmente llamada plantilla); Y es la profundidad (también llamada *tirante*); y K es el talud de las paredes del canal.

1.2 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA

Como su nombre lo indica, este dispositivo

Figura 1.3: La resistencia al paso de la corriente eléctrica por el diafragma, es diferente en función de la deformación.

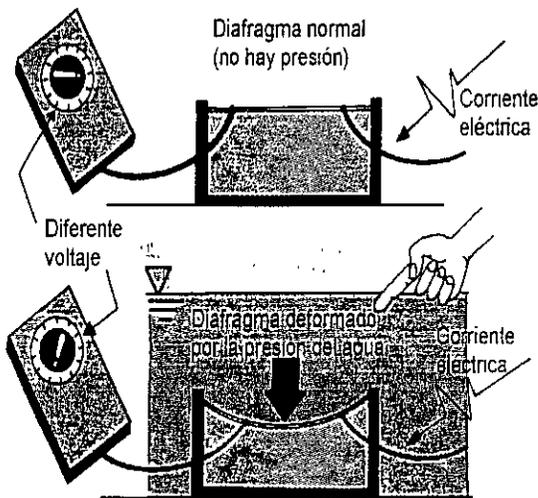
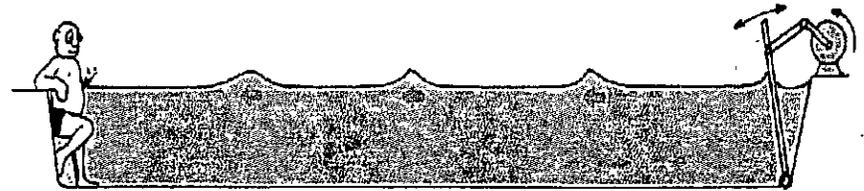
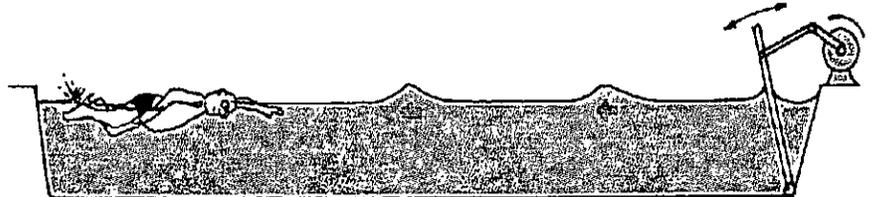


Figura 1.4: Si el nadador avanza hacia las ondas, las encuentra más rápido que si las espera al otro lado de la piscina. Lo mismo pasa con las ondas de ultrasonido.



El observador no se mueve



El observador se mueve en la dirección de las ondas

utiliza el llamado efecto doppler para medir la velocidad en la corriente. El efecto doppler es la alteración de la frecuencia de las ondas, en función del movimiento, ya sea del receptor o del emisor de las ondas. Es relativamente común encontrarlo a diario. Se puede apreciar cuando una persona escucha el sonido de la sirena de las ambulancias y nota que es más agudo conforme se acerca la ambulancia, y más grave al alejarse. Para entender mejor este efecto, imaginémosnos situados en el extremo de una piscina; en el otro extremo se encuentra una máquina que empuja el agua por medio de una pala a razón de una palada cada 3 segundos. Al sitio en que nos encontramos llegará una ola cada tres segundos. Pero ¿qué pasaría si comenzamos a movernos hacia la máquina? ¿Cada cuánto tiempo, es decir, con qué frecuencia encontraríamos las olas? Obviamente que serán menos de tres segundos.

Este efecto se produce en todos los tipos de ondas, ya sean sonoras, luminosas o de radio. Precisamente la alteración de las ondas de sonido, o mejor dicho de ultrasonido, es lo que utiliza el medidor de efecto doppler. El ultrasonido es un sonido con frecuencia más alta que la perceptible por el oído humano. El medidor tiene unos emisores de ondas de ultrasonido y unos receptores de las mismas. Primeramente el emisor envía una onda a una determinada frecuencia y el receptor capta las ondas que son reflejadas en el agua, inclusive, la onda puede reflejarse en partículas de sólidos en suspensión o en burbujas de aire. Si el agua está en movimiento, las ondas reflejadas tendrán una frecuencia diferente de la emitida; la diferencia de frecuencia indica al dispositivo la velocidad de la corriente.

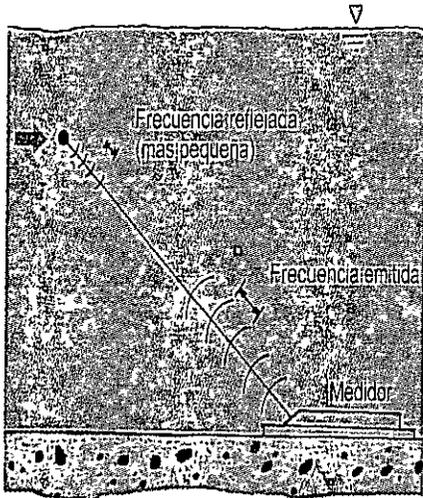


Figura 1.5: La frecuencia emitida es más lenta que la reflejada, debido a que las partículas de agua avanzan y reflejan más rápido las ondas emitidas.

En función de la forma en como se envía el rayo se tienen dos tipos de medidores: perfiladores y continuos.

1.1.1. Dopplers perfiladores

Tales como el medidor ADFM (*Acoustic Doppler Flow Meter*) de la compañía estadounidense MGD Technologies Inc. de California.

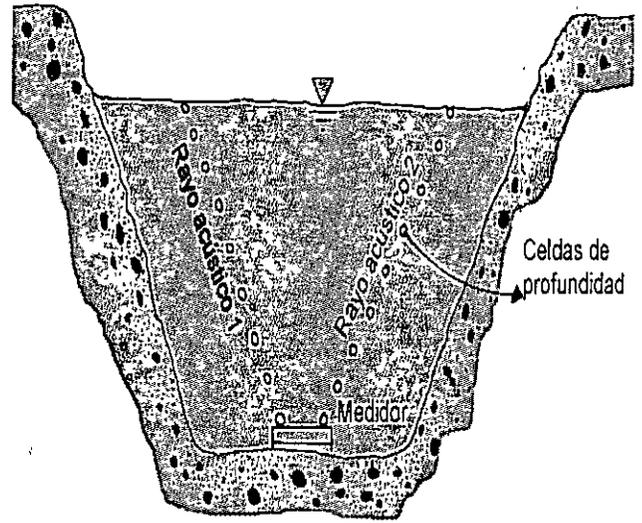
El medidor divide la señal reflejada en intervalos regulares que corresponden a diferentes profundidades de agua. La velocidad se calcula a partir de la señal reflejada en cada intervalo. El resultado es un perfil o distribución de velocidades a lo largo de la dirección del rayo de ultrasonido (ver figura 1.6).

La dirección de los perfiles de velocidad está relacionada con la geometría del medidor ya que tiene un emisor de ondas en la parte frontal y otra en la parte posterior, tal como se observa en la figura

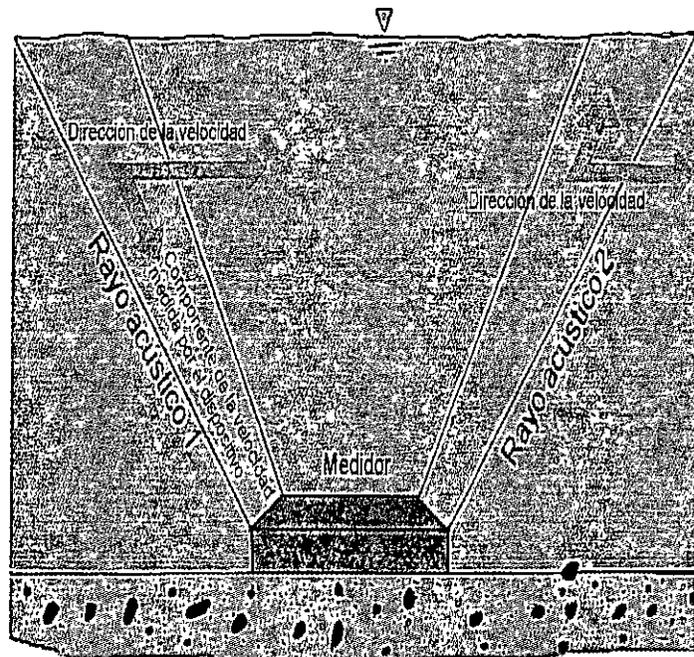
1.7. Los datos de cada rayo acústico se promedian para obtener mejor precisión.

1.6: El medidor de efecto doppler del tipo perfilador puede medir velocidades en cada celda de profundidad.

Debido a que la medición se hace en la dirección del rayo, el medidor reporta la componente de la velocidad del flujo en esta dirección. Para que esto no cause problemas de precisión, el medidor doppler perfilador manda unos rayos acústicos muy delgados. Además, los intervalos entre una emisión de rayos y otra, son tan cortos que la velocidad reportada es la de un pequeño volumen de agua (cilindros de aproximadamente 5 centímetros de largo y cinco centímetros de diámetro).



1.7: El medidor de efecto doppler del tipo perfilador tiene emisores y receptores en la parte frontal y en la parte posterior, así logra mayor precisión.

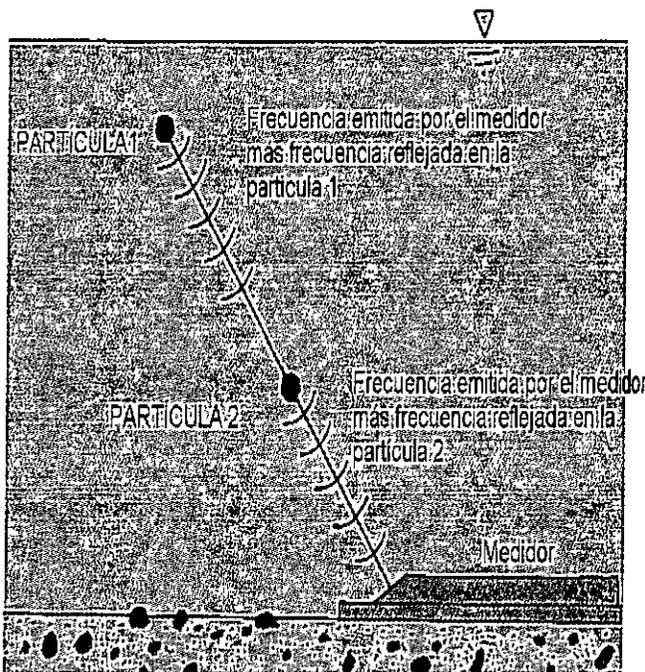


Los datos de velocidad de los dos rayos acústicos se manejan por medio de fórmulas matemáticas para describir las velocidades en toda el área hidráulica de la sección transversal. Las fórmulas empleadas utilizan algunos artificios para interpolar los puntos medidos, de tal manera que el resultado es la descripción de todas las velocidades en la sección transversal.

1.1.2. Dopplers continuos

Este es el caso del medidor Starflow de la compañía australiana Unidata que envía una señal continua y mide los reflejos en todas y cada una de las partículas de agua o sedimentos, las velocidades de las partículas son combinadas para obtener

Figura 1.7. El medidor de efecto doppler del tipo continuo registra una velocidad promedio en función de las frecuencias reflejadas al mismo tiempo en todas las partículas en movimiento.



una velocidad parecida a la velocidad media.

Los Dopplers perfiladores son generalmente más complejos que los continuos y, por lo tanto, mucho más caros. Los dopplers perfiladores pueden llegar a los 17,000 dólares, mientras que los continuos tienen un precio aproximado de 2,000 dólares. Estos precios son de fines del año 1999.

1.1.3. Corrección de la componente de la velocidad

Por otro lado, los medidores están colocados en el fondo del canal. Esto contradice un poco la definición del efecto doppler, ya que se dijo que el emisor o el receptor, se acercaban o alejaban entre sí. En los canales en agua no viaja en la dirección del medidor, sino que pasa por encima. Esto se soluciona de la siguiente manera: el aparato manda la señal acústica hacia delante de él (o hacia atrás) lo que le permite medir la componente la velocidad

de la corriente en la dirección del rayo acústico, y por medio de una fórmula trigonométrica sencilla que relaciona la velocidad medida y el ángulo de inclinación del rayo, calcula la velocidad del flujo.

1.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

El medidor también registra la temperatura del agua por medio de

un termómetro. Esta variable es necesaria para corregir el valor de la velocidad del sonido en el agua ya que el medidor realiza los cálculos para una velocidad de referencia con una temperatura de 20° y si la temperatura es diferente esto provocaría un error.

AUTOEVALUACIÓN 1



Conteste las preguntas siguientes marcando la respuesta que considere correcta.

1. ¿Por qué se dice que el medidor de efecto doppler representa una nueva generación de medidores?
 - a) Porque es un invento reciente.
 - b) Porque mide diferentes variables al mismo tiempo.
 - c) Porque utiliza el efecto doppler para medir.
2. ¿Qué es un transductor?
 - a) Es un dispositivo electrónico que mide el gasto en un canal.
 - b) Es un dispositivo que proporciona una salida eléctrica en respuesta a una magnitud física que se desea medir.
 - c) Es un dispositivo que mide diferentes variables.

3. ¿Cómo calcula el medidor de efecto doppler el área hidráulica del canal?
- a) Primero calcula un voltaje, después una presión, una profundidad y finalmente el área hidráulica.
 - b) Por medio del efecto doppler
 - c) Por medio de fórmulas.
4. ¿Qué es el efecto doppler?
- a) Es la alteración de la frecuencia de las ondas, en función del movimiento, ya sea del receptor o del emisor.
 - b) Es la suma de las frecuencias de las partículas del agua en el receptor.
 - c) Es el movimiento relativo de un emisor de ondas de ultrasonido respecto de un receptor.
5. ¿Cuál es la diferencia entre un doppler perfilador y un doppler continuo?
- a) Que uno mide perfiles y otro mide frecuencias.
 - b) Que uno mide velocidades en diferentes profundidades y otro una velocidad promedio.
 - c) El precio.
6. ¿Para qué se mide la temperatura?
- a) Para revisar el rango de funcionamiento del medidor
 - b) Para corregir el valor de la velocidad del sonido en el agua.
 - c) Para evitar daños en el medidor.

2. REQUERIMIENTOS DE INSTALACIÓN FÍSICA

Todos los medidores se calibran en laboratorio, para ciertas condiciones de llegada del agua al medidor. Estas condiciones deben ser las mismas, o por lo menos parecidas, para el sitio donde se coloque. Cuando se tienen condiciones diferentes se puede incurrir en grandes errores.

Varios aspectos deben cuidarse en la instalación del medidor. Básicamente se relacionan con el efecto que se tenga sobre la medición de la velocidad y el funcionamiento del medidor.

2.1 TRAMO RECTO MÍNIMO ANTES DEL MEDIDOR

Una de las principales restricciones que debe tener un sitio donde se va a colocar el medidor es la uniformidad de la corriente. Esto significa que antes del medidor se debe tener un tramo recto y sin obstáculos de una longitud mínima. Los obstáculos pueden ser, inclusive, bancos de arena o de grava asentados en el fondo del canal como producto del azolve. Las siguientes son condiciones que deben cumplirse en el canal.

2.1.1 Tramo recto ideal

El tramo recto debe ser mayor de 40 veces el radio hidráulico de la sección donde se encuentra el medidor. El radio hidráulico es el área hidráulica entre el perímetro mojado.

2.1.2 Tramo recto mínimo

Si el criterio anterior no se cumple, por lo menos se debe tener un tramo recto de 10 veces el ancho del fondo del canal.

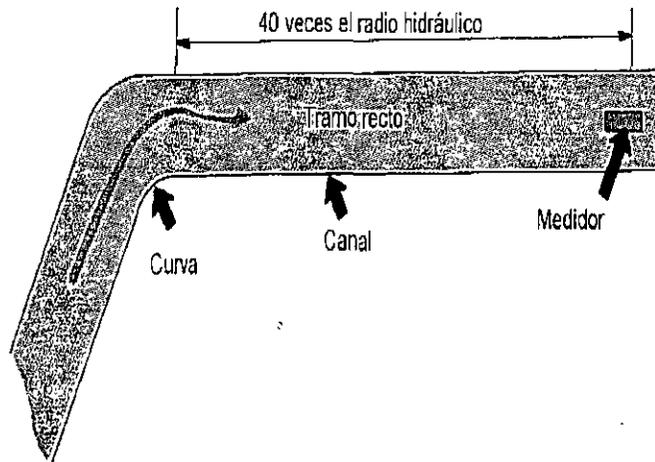


Figura 2.1.1 Lo mejor es que se tenga un tramo recto de 40 veces el radio hidráulico antes del medidor.

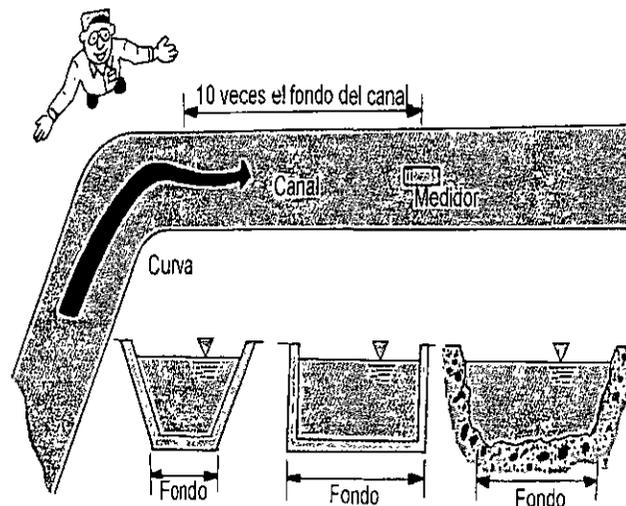


Figura 2.1.2 Por lo menos debe tenerse un tramo recto antes del medidor de 10 veces la profundidad del canal. Téngase cuidado con el tipo de sección.

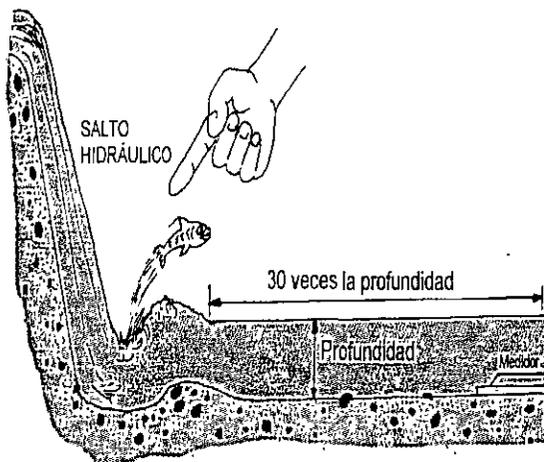


Figura 2.1.3 Un salto hidráulico causa exceso de burbujas, por lo tanto el medidor debe estar alejado del salto por lo menos 30 veces la profundidad.

El fondo del canal es diferente para cada tipo de sección transversal. Si el canal es rectangular el fondo será igual al ancho de la superficie del agua. Si es irregular el fondo será, aproximadamente, la parte más horizontal del fondo.

2.1.3 Salto hidráulico antes del medidor

Si se tiene un salto hidráulico antes del medidor, éste debe estar a por lo menos 30 veces la profundidad. El salto hidráulico se presenta normalmente después de una "caída" en un canal. Dicho salto hidráulico genera gran cantidad de burbujas que pueden alterar las mediciones. Se dijo en el capítulo uno que el efecto doppler actúa en las partículas de agua, de sólidos en suspensión y en las burbujas de agua. Sin embargo, la presencia de un salto hidráulico genera una cantidad excesiva de burbujas que sí alteran la medición.

2.1.4 Dispositivos orientadores de flujo

Si se usa algún dispositivo para orientar el flujo, debe colocarse a más de 10 veces la profundidad. Después de pasar por una curva (por ejemplo) se tienen líneas de corriente que no son paralelas a las paredes del canal. Esto hace que las mediciones de gasto tengan errores. Para corregir esto, se introducen los orientadores de flujo para "orientar" las líneas de corriente. Dichos orientadores pueden ser simplemente unos tubos colocados después de la curva.

No siempre se desvían las líneas de corriente por la presencia de curvas. También se puede presentar este fenómeno a la salida de obras de toma de presas o por la presencia de saltos

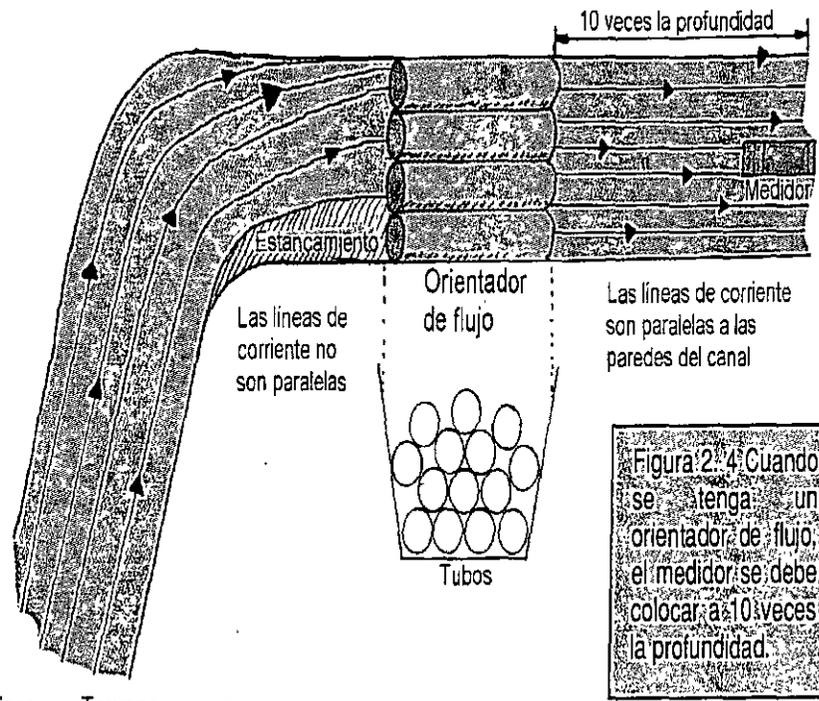


Figura 2.4: Cuando se tenga un orientador de flujo, el medidor se debe colocar a 10 veces la profundidad.

hidráulicos. Tampoco es exclusiva la colocación de tubos; es posible el uso de conductos de otras formas geométricas (rectangulares, hexagonales, etc.).



a) Patrón típico de velocidades



2.2 ANCHO MÁXIMO DEL CANAL

Las restricciones relacionadas con el área hidráulica, se consideran por medio del ancho de la superficie del agua. Estas restricciones se toman en cuenta porque el medidor abarca solamente una pequeña franja encima de él, y basado en esta información, el medidor infiere un patrón de velocidades en toda la sección (ver figura 2.5). Si la sección es muy ancha se pueden tener errores ya que es muy posible la presencia de velocidades que están fuera del alcance de la zona de influencia del medidor y su magnitud no es igual a la velocidad inferida.

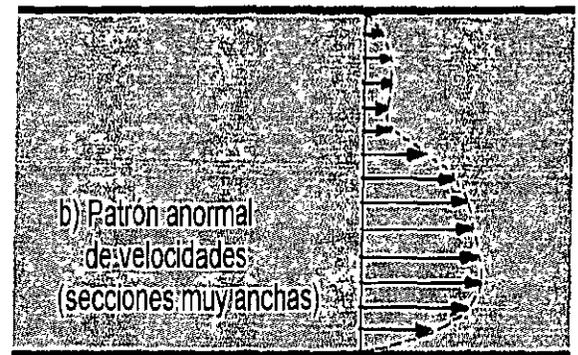


Figura 2.5: Cuando se tienen secciones muy anchas probablemente se presenten patrones de flujo anormales.

Se tienen las siguientes restricciones.

2.2.1 Canal regular

Si el canal es regular (rectangular, trapecial, etc) no debe tener un ancho mayor a diez veces la profundidad.

2.2.2 Canal irregular

Si el canal es irregular (en tierra) no debe tener un ancho mayor a cinco veces la profundidad.

2.3 RESTRICCIONES DEL SITIO DE INSTALACIÓN

2.3.1 Obstáculos aguas arriba del medidor

Tales como hierbas, rocas, etc.; esto se debe a que el medidor emite un rayo acústico inclinado por lo que la presencia de obstáculos antes de él pueden estorbar a la señal.

2.3.2 Variaciones del fondo del canal

Cuando se tengan escalones o irregularidades, se tendría el mismo efecto que el de una roca; es decir, la obstrucción del rayo acústico o la presencia de "ruido" en la señal.

La Tabla 2.1, muestra la distancia mínima a la que debe colocarse el medidor respecto a los obstáculos o a escalones.

2.3.3 Sólidos en suspensión y velocidades bajas

Cuando se tengan muchos sólidos en suspensión y velocidades bajas (menores a

Figura 2.6: Ancho máximo en canales regulares: 10 veces la profundidad.

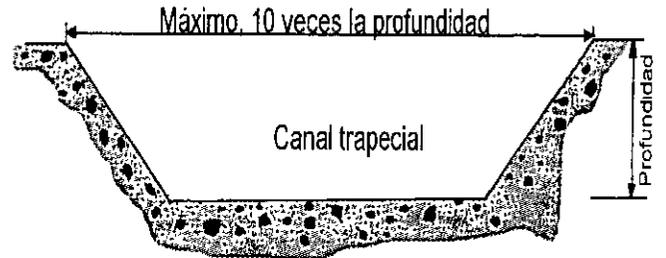
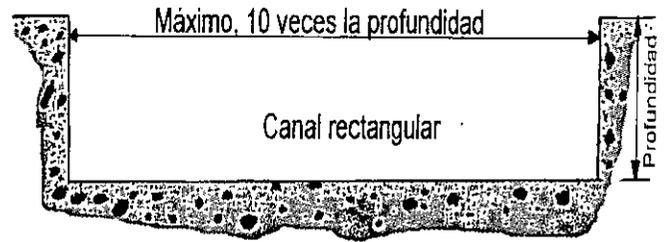


Figura 2.7: Ancho máximo en canales irregulares: 5 veces la profundidad.

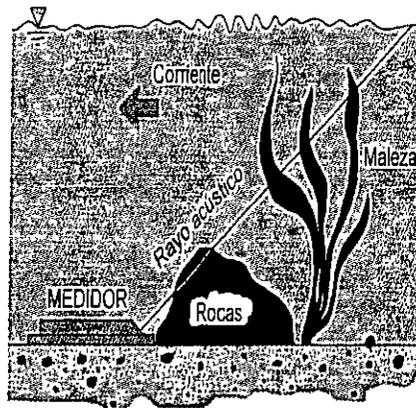
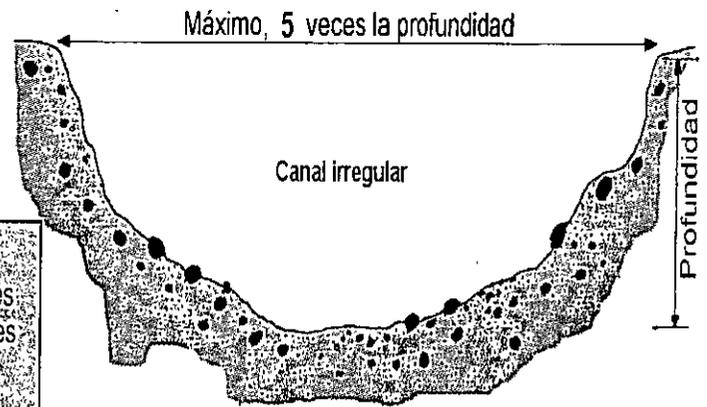


Figura 2.8: Colocación incorrecta del medidor por la presencia de obstáculos.

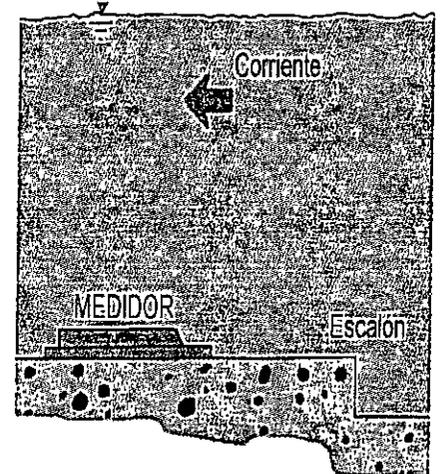


Figura 2.9: Colocación incorrecta del medidor por la presencia de escalones.

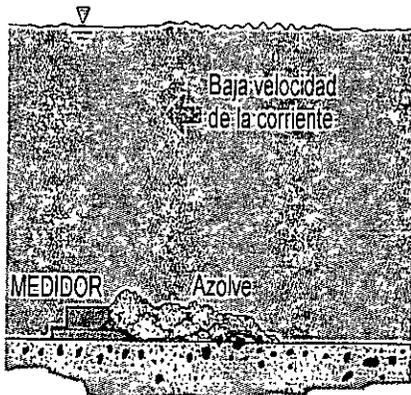


Figura 2. 10 Colocación incorrecta del medidor por la baja velocidad del flujo que provoca la acumulación de azolve

0.5 m/s) se puede presentar la acumulación de azolve que es altamente nocivo para el funcionamiento del medidor, ya que puede llegar a tapar los sensores que emiten y reciben los rayos acústicos y el sensor que mide la profundidad del agua.

Tabla 2. 1 Distancias mínimas a obstáculos en función de la profundidad.

Profundidad máxima en el canal*	Distancia mínima del medidor al obstáculo*
1	4
2	8
4	16
6	24

*Magnitudes en metros

2.3.4 Objetos sobre el medidor

Se debe tener cuidado cuando exista la posibilidad de que hojas u objetos parecidos caigan sobre el medidor. Estos objetos también obstruyen el correcto funcionamiento de los sensores de emisión-recepción de rayos acústicos.

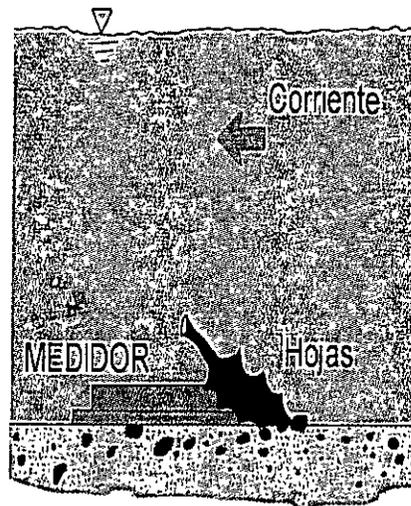


Figura 2. 11 Colocación incorrecta del medidor por la presencia de objetos que pueden caer encima del medidor.

2.3.5 Turbulencia de la corriente

Otro aspecto que se debe cuidar es la turbulencia. Cuando se presenta, las partículas de agua se mueven en trayectorias erráticas, hacia arriba y hacia abajo, inclusive hacia atrás. Si se recuerda que el medidor registra la velocidad del agua, viajando solamente en la dirección del mismo; entonces la velocidad que se registre no será para nada parecida a la velocidad media. Se ha reportado que pueden presentarse errores de hasta un diez por ciento.

La turbulencia puede generarse en saltos hidráulicos, a la salida de presas o simplemente cuando se tienen altas velocidades.

La misma turbulencia puede producir demasiadas burbujas que también afectan la precisión de la medición.

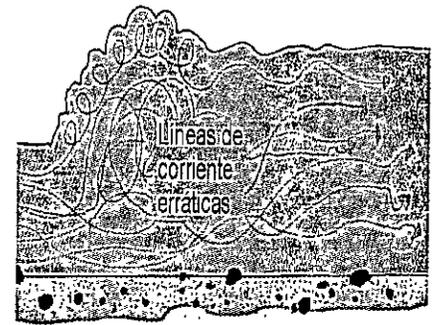


Figura 2. 11 La turbulencia generada por un salto hidráulico provoca líneas de corriente erráticas que inclusive se regresan.

2.3.6 Oleaje alto

Se considera que las olas provocadas por la turbulencia no deben exceder cinco centímetros por cada metro de profundidad del agua (ver tabla 2.2). Oleaje más alto puede provocar que el reflejo del rayo acústico se vea desviado ya que la superficie del agua no es horizontal en la parte donde incide el rayo y esta desviación genera "ruido" en las frecuencias reflejadas.

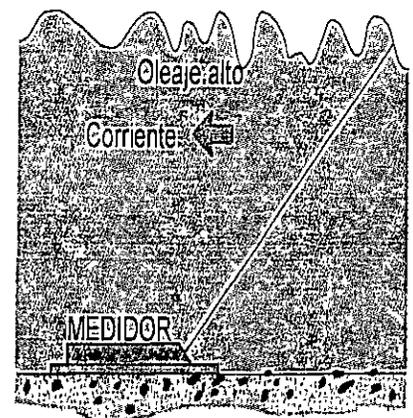


Figura 2. 12 Colocación incorrecta del medidor por la presencia de oleaje alto.

Tabla 2. 2 Altura máxima de oleaje en función de la profundidad.

Profundidad máxima en el canal*	Altura máxima del oleaje*
1	0.05
2	0.10
4	0.20
6	0.30

*Magnitudes en metros

2.3.7 Profundidad mínima

Los proveedores de los medidores indican que es posible la medición en canales poco profundos. Sin embargo, en pruebas de laboratorio se ha observado que en profundidades menores a sesenta centímetros, la medición del gasto tiene errores significativos. Por lo tanto puede considerarse como la profundidad mínima de medición.

2.4 RANGOS DE VELOCIDAD

Es muy importante atender a los rangos de funcionamiento de los medidores. Cada marca de medidor tiene su propio rango, por ejemplo para las marcas UNIdata y MGD se tienen los rangos indicados en la Tabla 2. 3.

Tabla 2. 3 Rangos de funcionamiento

Modelo	Velocidad m/s	Profundidad m	Temperatura °C
ADFM (MGD)	0 a 9.14	0.1 a 5	-5 a 35
Starflow Unidata	0.02 a 4.5	0 a 5	0 a 60

AUTOEVALUACIÓN 2



Conteste las preguntas siguientes marcando la respuesta que considere correcta.

- ¿Por qué se tienen que respetar ciertas condiciones en los sitios de colocación de medidores?
 - Porque los medidores se calibran bajo algunas condiciones y éstas deben ser parecidas en el campo.
 - Porque el canal debe ser recto
 - Porque se debe evitar la presencia de burbujas.
- ¿Cuál es el tramo recto ideal que debe tenerse antes del medidor?
 - 40 metros.
 - 40 veces la profundidad del canal.
 - 40 veces el radio hidráulico.
- ¿Qué tipo de problemas provoca un salto hidráulico para la medición?
 - Turbulencia y burbujas
 - Turbulencia y exceso de burbujas
 - Turbiedad y burbujas
- ¿Por qué se presentan problemas en secciones muy anchas?
 - Porque no se puede colocar el medidor.
 - Porque se presentan patrones de flujo anormales.
 - Porque probablemente se presenten patrones de flujo anormales.
- ¿Por qué se presentan problemas cuando se tiene obstáculos antes del medidor?
 - Porque se estorba al rayo acústico.
 - Porque no se puede ver el medidor.
 - Porque se altera la frecuencia reflejada.
- ¿Qué pasa en el medidor cuando se tienen muchos sólidos en suspensión y bajas velocidades?
 - El medidor se detiene
 - Se tapan los sensores
 - Se tapa la frecuencia emitida
- ¿Por qué se afecta el medidor cuando se tiene alta turbulencia en la corriente?
 - Porque se tienen líneas de corriente erráticas y cantidad excesiva de burbujas.
 - Porque las líneas de corriente no son paralelas.
 - Porque se tienen líneas de corriente erráticas, cantidad excesiva de burbujas y "ruido" en la frecuencia reflejada.
- ¿Por qué se considera una profundidad mínima de medición de sesenta centímetros?
 - Porque así lo dicen los fabricantes.
 - Porque se hicieron pruebas de laboratorio.
 - Porque los fabricantes hicieron pruebas de laboratorio y así lo recomiendan.

3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INSTALACIÓN

Cuando se instale un medidor se deben cuidar otros aspectos; no es suficiente con respetar los requisitos del capítulo Dos. Enseguida se describen dichos aspectos.

3.1 COLOCACIÓN AL CENTRO DEL CANAL

El medidor debe colocarse al centro del canal. Esto tiene mucha importancia ya que si el medidor está muy alejado del centro no tomará la velocidad media representativa y esto se reflejará en la precisión del gasto. Esto no es grave si se coloca a unos centímetros alejado del centro; se recomienda no exceder un diez por ciento del ancho del canal.

3.2 NIVELACIÓN Y ALINEACIÓN

El medidor debe estar nivelado, y alineado con el eje longitudinal del canal.

La nivelación se requiere porque el rayo acústico sale con una inclinación predeterminada, respecto de la horizontal, y para conocer la velocidad del flujo se aplica una fórmula trigonométrica, si el ángulo es diferente el cálculo tendrá errores.

Con respecto a la alineación con el eje longitudinal del canal, debe recordarse que el medidor registra la velocidad al centro del canal porque allí es donde está la velocidad media. Si el rayo acústico se dirige hacia un lado del canal, se registrarán velocidades que no representan dicha velocidad media.

Una inclinación en la horizontal reduce la velocidad medida en, aproximadamente, 1.5% por cada 10 grados de desviación. Por otro lado, si el medidor no está alineado con el eje del canal, entonces los errores pueden ser mayores. Para errores de 10 grados en el ángulo, se pueden tener errores en el gasto de hasta 8.5%.

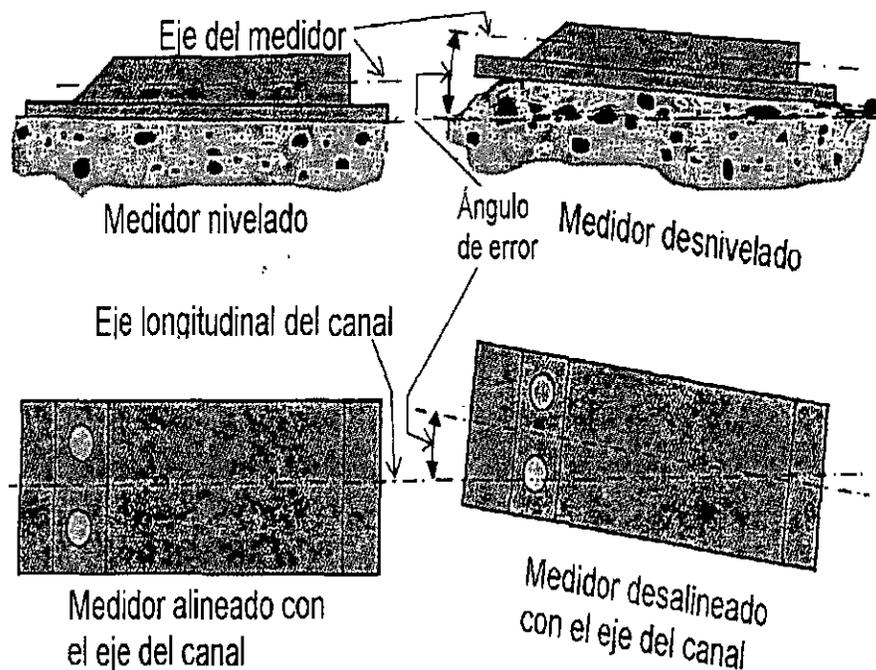


Figura 3.1 El medidor debe estar nivelado respecto de la horizontal y alineado con el eje longitudinal del canal.

AUTOEVALUACIÓN 3



1. ¿Porqué se debe colocar el medidor al centro del canal?
 - a) Porque es más fácil.
 - b) Porque se reflejan mejor las ondas de ultrasonido.
 - c) Porque al centro del canal se presenta la velocidad media.

2. ¿Para qué se nivela el medidor?
 - a) Para evitar el azolve.
 - b) Para registrar la máxima velocidad.
 - c) Para registrar la velocidad media.

3. ¿Para qué se alinea el medidor con el eje longitudinal del canal?
 - a) Para interceptar las trayectorias de la corriente.
 - b) Para registrar la velocidad media.
 - c) Para no tener errores.

4. PRUEBAS DE PRECISIÓN Y CALIBRACIÓN

4.1 PRUEBAS DE PRECISIÓN

En principio debe suponerse que este tipo de dispositivos vienen calibrados de fábrica y deberían estar funcionando bien. En caso de sospecha de mal funcionamiento se deben realizar comparaciones de mediciones contra otro aparato. Esto es un asunto que puede resultar delicado puesto que si se va a revisar la precisión de un dispositivo de medición, se deben comparar sus resultados contra otro del que se esté completamente seguro que tiene mejor precisión que el que se va a revisar. Y obviamente que surge la pregunta: ¿cómo se sabe que el dispositivo de referencia está funcionando bien? Esto conduce a un círculo vicioso ya que entonces se debe comparar el aparato de referencia contra otro de aún mayor precisión. La mejor solución en estos casos es la comparación del dispositivo a revisar contra varios dispositivos de referencia.

4.1.1 Revisión en laboratorio

Lo mejor que puede hacerse es trasladar el dispositivo a un laboratorio, ya que las condiciones de revisión de gastos están mejor controladas. Se tiene mejor conocimiento de los dispositivos y en algunos laboratorios ya se cuenta con instalaciones especiales para este tipo de trabajo. En los laboratorios existe el personal técnico calificado para realizar las pruebas en los dispositivos. Inclusive existen laboratorios certificados que han obtenido el reconocimiento de organismos

especializados que los acreditan y respaldan.

La gran desventaja de revisar los medidores en laboratorio es que difícilmente se podrán tener gastos grandes. Por ejemplo, un laboratorio con capacidad de manejar gastos mayores a un metro cúbico no son comunes. Esto restringe la revisión del funcionamiento del medidor, a gastos más bien pequeños, del orden los 50 a 200 litros por segundo; y en canales, estos gastos son muy pequeños.

4.1.2 Revisión en campo

La revisión de la precisión de medidores en condiciones de campo nunca se librará de incertidumbres. Se puede decir que un error de 5% en gasto de cualquier dispositivo de medición es excelente, inclusive uno de 10% no es exagerado. Esto resulta de la gran dificultad de realizar mediciones precisas o mejor dicho de la dificultad de contar con un dispositivo de referencia con error cero, o por lo menos, con error conocido.

Sin embargo, puede tenerse la necesidad de revisar la precisión del gasto de un medidor de efecto doppler y de alguna manera debe actuarse, aunque no debe perderse de vista lo anteriormente mencionado.

Se deben realizar por los menos cinco experimentos para diferentes gastos. Y en cada gasto se deben tomar por lo menos cinco lecturas, al mismo tiempo en el medidor de efecto doppler y en el dispositivo de referencia.

La revisión de campo de los errores de medición de un medidor de gasto de efecto doppler se hace con base en la

comparación de sus resultados contra otro de referencia. Este otro dispositivo puede ser cualquiera con tal de que consideramos los siguientes aspectos.

- a) Debe ser posible su utilización. Pueden surgir problemas tales como el espacio necesario para colocarlo, o la imposibilidad de "cortar" el agua para fijarlo, etcétera.
- b) Se deben cumplir los requisitos de cualquier sección de medición. (ver capítulo 2).
- c) No sería lógico utilizar métodos o técnicas de conocida poca precisión tales como flotadores o trazadores.

Antes de realizar pruebas de precisión se deben revisar las especificaciones y requerimientos de instalación, ya que si el sitio no cumple con los requerimientos; el aparato que se use tampoco medirá bien. Si los requerimientos del sitio no se cumplen se puede realizar la medición en otro sitio no muy alejado y se debe estar seguro que entre ambos sitios no se tienen entradas ni salidas de agua.

Los siguientes son los dispositivos y aparatos que pueden utilizarse como referencia, para comparar los gastos.

- Método volumétrico
- Molinete
- Vertedores
- Orificios

En cualquier caso es recomendable recurrir a la literatura adecuada para aplicar correctamente cada uno de los métodos.

4.2 CALIBRACIÓN

Los modelos conocidos de este tipo de medidores son tres, correspondientes a igual número de fabricantes. Dos de ellos, los modelos de Unidata y MGD, no tienen forma de calibrarse explícitamente, es decir, normalmente NO SE CALIBRAN; si se detecta un error y es posible su calibración, dicha calibración no se puede incorporar en la programación interna de los aparatos y únicamente se pueden hacer correcciones a la información ya procesada. Por el contrario el modelo de medidor de efecto doppler del fabricante Badyer Meter, debe calibrarse; y dicha calibración no es sencilla ya que es necesario realizar modificaciones en la programación del dispositivo y se requiere personal calificado y un laboratorio.

AUTOEVALUACIÓN 4



1. ¿Por qué se recomienda revisar los medidores en laboratorio?
 - a) Porque el agua está limpia.
 - b) Porque las condiciones están más controladas.
 - c) Porque en campo no se puede.

2. ¿Qué porcentaje de error se considera conveniente en la medición del gasto en canales?
 - a) 5% es excelente y 10% no es exagerado.
 - b) 10% es excelente.
 - c) 5% no es exagerado.

3. Antes de revisar el funcionamiento de un medidor ¿qué se debe verificar?
 - a) Las especificaciones y requerimientos de la instalación.
 - b) La exactitud de los aparatos de verificación.
 - c) Las condiciones de laboratorio.

5. REGISTRO E INTERPRETACIÓN DE LECTURAS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Este tipo de medidores reportan su información de manera digital o en un pequeño rollo de papel. Por ejemplo, el modelo *Starflow* del fabricante Unidata reporta su información solamente por medio de una computadora que se conecta al medidor. De esta manera se puede dejar funcionando el dispositivo para almacenar la información en una memoria interna incorporada al cuerpo del medidor. La capacidad no es muy grande pero puede almacenar datos hasta por quince días. Transcurrido este tiempo se debe "vaciar" la información en una computadora.

Una de los aspectos más importantes del procesamiento de la información es el número de datos que se requieren y su posterior manejo. Veamos esto en detalle: este tipo de medidores están diseñados para tomar una lectura cada determinado tiempo y almacenarla en su memoria. Su capacidad es impresionante: pueden tomar lecturas cada segundo o cada 10 minutos, por ejemplo. Imaginemos que se toman lecturas a cada segundo, esto significa que tendremos casi un millón trescientas mil lecturas, en quince días; obviamente esto es demasiado y sería difícil trabajar con tal cantidad de información. Además, ¿qué se haría con esta información?

Esto es fundamental: antes de decidir cuánta información se requiere, se debe saber qué se hará con ella. Esto nos lleva a

pensar sobre el objetivo de medir; es decir, qué se pretende con la medición: cobro del agua, administración, etcétera. Una vez que se define el objeto de la medición, es posible tener una estimación del nivel de medición. Por ejemplo, para fines de cobro hasta una medición diaria sería útil; en cambio para administración del agua probablemente se requiera un poco más ya que los gastos no son constantes en un canal.

Graph of Flow (in litres) (Space=next series, PgDn=next page)

Depth(RAW) FlowRt(RAW) TFlow(RAW) 05/10/95 07:48 - 05/10/95 08:15
 mm l/s l 05/10/95 07:49 - 05/10/95 08:12

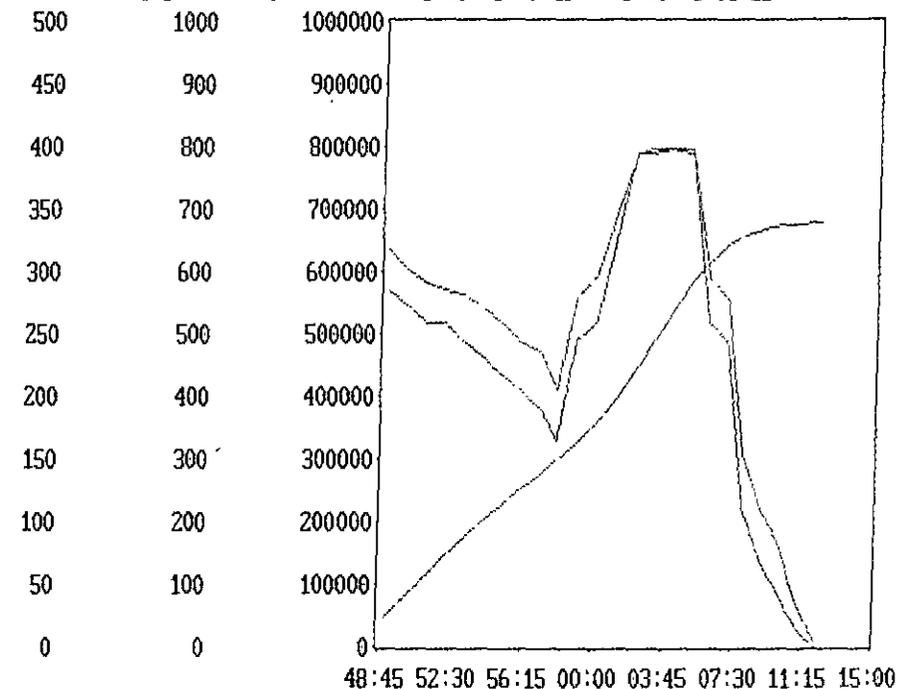


Figura 5.1: Pantalla de reporte de datos del medidor Starflow de la marca Unidata

AUTOEVALUACIÓN 5



1. ¿De qué manera reportan los medidores de efecto doppler la información?

- a) Por medio de ultrasonido.
- b) De manera digital o en un pequeño rollo de papel.
- c) De manera que se pueda transmitir.

2. ¿qué es lo más importante en el procesamiento de la información?

- a) El número de datos que se requieren
- b) El número de datos que se requieren y su posterior manejo.
- c) El manejo de la información.

6. MANTENIMIENTO BÁSICO

Los principales aspectos que deben cuidarse son los siguientes.

6.1 BATERÍA

Debe vigilarse que la batería esté siempre bien cargada, en los casos que no se tenga suministro de energía alterna.

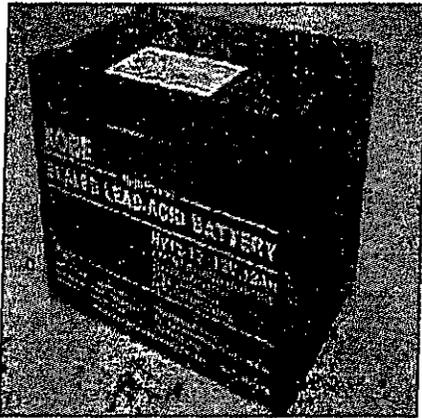


Figura 6.1: La batería debe estar cargada.

6.2 DIAFRAGMA

Una de las partes más sensibles del medidor es el diafragma con que se calcula la profundidad del agua. Lo más recomendable es sacar del agua el medidor una vez por mes y limpiarle cuidadosamente la zona cercana al diafragma. Lo más común será el lodo del azolve el que obstruya o dañe el diafragma.

El modelo Starflow de Unidata, es el más sensible a este problema porque tiene el sensor colocado en la parte baja del medidor y se conecta al exterior por medio de unos pequeños conductos que se pueden taponar fácilmente.

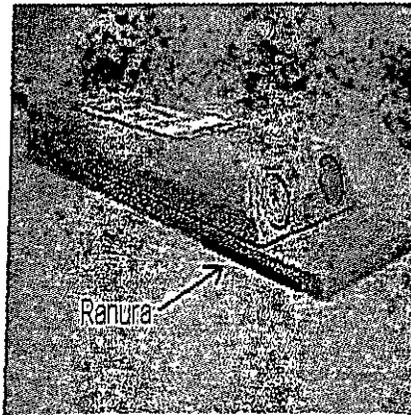


Figura 6.2: El Modelo Starflow de Unidata es más sensible al taponamiento porque tiene los conductos hacia el diafragma en una ranura en la parte baja del dispositivo.

El modelo ADFM, por el contrario, tiene el sensor en la parte superior y no tiene conductos. Este modelo fallaría en aquellos casos en los que el azolve cubra completamente el medidor.

6.3 LIMPIEZA DEL CANAL

El crecimiento de maleza acuática y la acumulación de azolve, en el fondo, son comunes en los canales de riego. Cualquiera de los dos aspectos es de gran perjuicio para el funcionamiento del medidor de efecto doppler, ya que se obstruye al rayo acústico.

Para evitarlo es necesario revisar periódicamente el fondo del canal en las cercanías del sitio de colocación del medidor y realizar la limpieza correspondiente en caso necesario.

AUTOEVALUACIÓN 6



1. ¿Qué se debe vigilar en la batería del medidor?
 - a) Que esté conectada.
 - b) Que esté cargada.
 - c) Que esté limpia.
2. ¿Cuál es una de las partes más sensibles del medidor?
 - a) El cable
 - b) El sensor de temperatura
 - c) El diafragma
3. ¿Para qué se debe limpiar periódicamente el área cercana al medidor?
 - a) Para evitar obstrucciones
 - b) Para desmontar más fácilmente el medidor.
 - c) Para tener limpio.

7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Estos dispositivos representan una nueva generación de medidores de gasto en canales, tienen gran capacidad de desempeño y como todo, tienen algunas desventajas.

7.1 VENTAJAS

a) No es necesario tener otro elemento de medición.

En otros medidores de gasto, se requiere contar con otras herramientas de medición. Por ejemplo, si se quiere medir con un molinete se debe tener una cinta métrica, un estadal, escandallo, etc. El medidor de efecto doppler no requiere nada de esto.

Otros medidores, registran la profundidad de manera automática pero requieren de otro elemento para calcular el gasto. Este otro elemento puede ser un vertedor o un aforador y tampoco es necesario con el medidor de efecto doppler.

b) Se pueden instalar en sitios donde otros no funcionarían.

Comúnmente se ha recurrido a los llamados aforadores de garganta larga para medir en sitios donde se requiere conocer el volumen y no solamente el gasto. Sin embargo, estos aforadores no se pueden colocar en cualquier sitio; si se tienen bajas pendientes, muy probablemente el remanso que provocan afecta la operación del canal; inclusive llega, en algunos casos, a presentarse desbordamiento del canal.

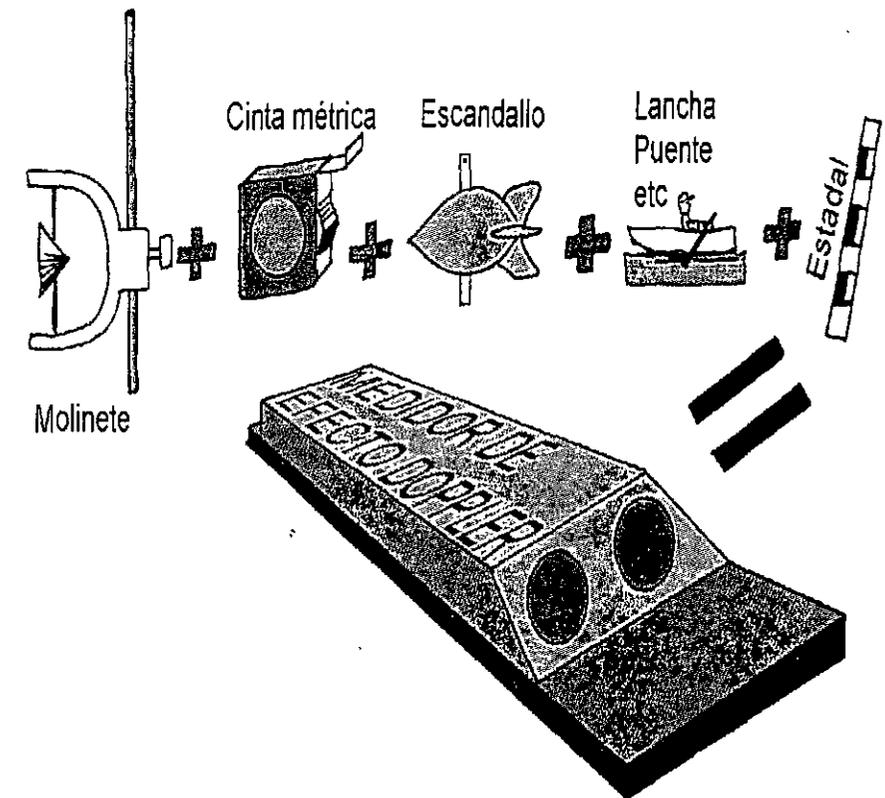


Figura 7-1 El medidor de efecto doppler no requiere de otros elementos para realizar las mediciones.

El medidor de efecto doppler es un dispositivo muy pequeño. Las dimensiones de los modelos actuales no rebasan los treinta centímetros de largo, ni miden más de cinco de alto. Esto hace que su presencia en el fondo del canal no altere las condiciones hidráulicas.

c) Tienen un amplio rango de funcionamiento.

Como puede verse en la tabla 2.3, el modelo ADFM es capaz de registrar velocidades hasta de 9 m/s. Como referencia se puede decir que velocidades mayores a 3 m/s son muy difíciles de medir con molinete.

d) Es posible el envío de información por medios de transmisión remota.

La información que se obtiene con los medidores de efecto doppler está codificada de tal manera que puedes ser susceptible de manejo por transmisión remota. Obviamente se requiere de elementos adicionales para hacerlo.

e) La información pasa directamente a archivos de computadora.

Esto tiene la gran ventaja de que puede manipularse la información en hojas de cálculo, por ejemplo, y realizar operaciones útiles para obtener promedios, volúmenes entregados, cobro del agua, etcétera.

f) No es necesario tomar lecturas diariamente

Otra gran ventaja es que el dispositivo puede trabajar autónomamente durante largos periodos, sin necesidad de tomar las lecturas. Esto se debe a que los dispositivos cuentan con una memoria electrónica incluida en el cuerpo del medidor, que si bien no es de mucha capacidad, fácilmente puede guardar la información de 15 días tomando lecturas cada 5 minutos. Adicionalmente se pueden adaptar a los medidores unos almacenadores externos de información con gran capacidad de memoria. A estos almacenadores se les llama *Dataloggers*. Estos almacenadores o *dataloggers* también tienen una pantalla donde se puede ver el gasto que está pasando en ese momento, además de otras variables (velocidad, temperatura, gasto máximo, mínimo o promedio; volumen, etcétera). Finalmente, estos *dataloggers* tienen los elementos necesarios para dejar lista la conexión para transmisión remota.

7.2 DESVENTAJAS

a) Costo inicial

El precio relativamente alto con respecto a, por ejemplo, el molinete. Además, si se quiere tener todos los accesorios del dispositivo, como lo son la batería, gabinete, terminal de conexiones, *dataloggers*, panel solar, cargadores de baterías, etcétera, el precio fácilmente puede rebasar los cincuenta mil pesos en el modelo más barato (fines del año 1999) sin tomar en cuenta todos los costos de instalación y caseta de protección.

b) En caso de fallas, solamente el fabricante sabe qué hacer.

Debido a que se trata de aparatos de reciente aparición, únicamente los fabricantes tienen, actualmente, la capacidad de arreglar los aparatos en caso

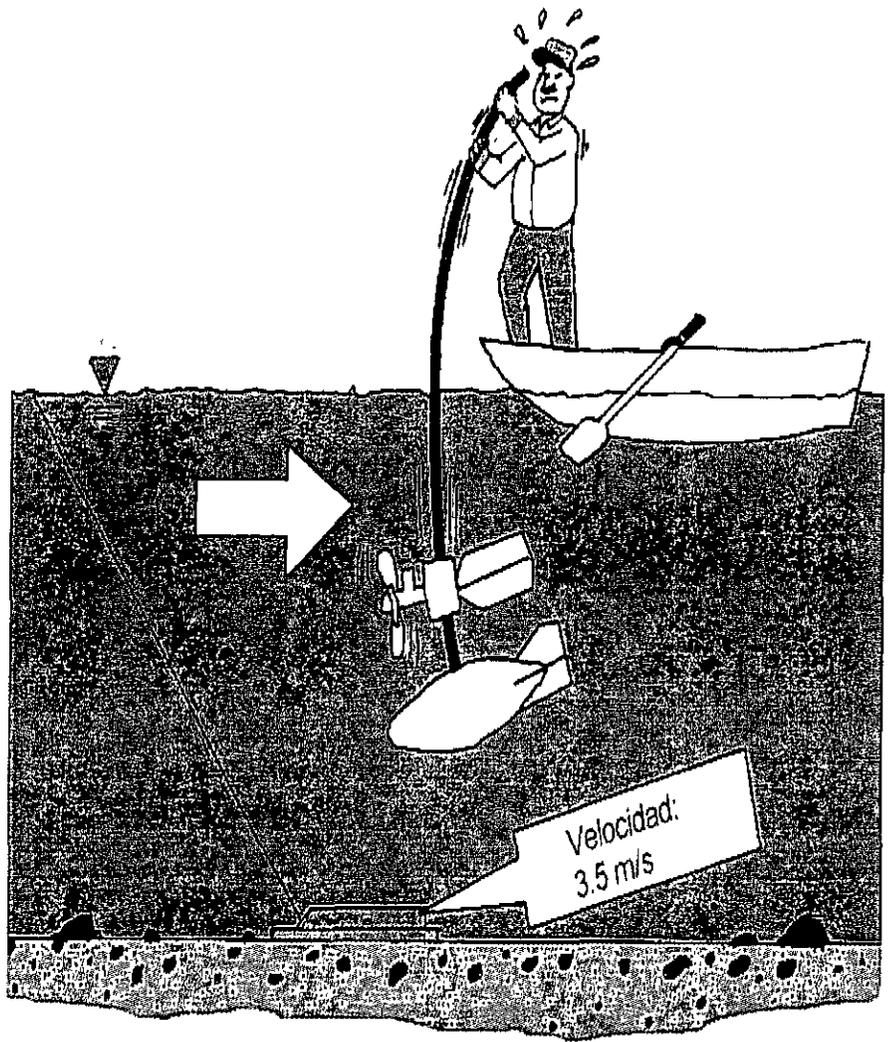


Figura.7- 2. Velocidades mayores a 3 m/s son muy difíciles de medir con molinete. Esto no es problema para el medidor de efecto doppler; mide velocidades de hasta 9 m/s.

de fallas. Además se debe tener en cuenta que no se tienen proveedores nacionales.

c) Son fácil presa del vandalismo.

Al ser pequeños es fácil quitarlo del fondo del canal, cuando éste no tenga agua. Inclusive, si la caseta donde se tienen los componentes externos, no está bien protegida, se puede prestar el robo o daño de los equipos.

d) Se requiere secar los canales para su instalación.

Es necesario que el canal esté seco para poder instalar el medidor. Caso contrario del molinete el cual puede funcionar en cualquier momento.

e) Se debe manejar un programa de cómputo para sacar la información.

Esto podría parecer intrascendente, pero se debe tomar en cuenta, ya que en muchos de los sistemas de conducción, los operadores no tienen la capacitación necesaria para manejar equipos de cómputo.

AUTOEVALUACIÓN 7



1. ¿Por qué el medidor de efecto doppler no altera las condiciones hidráulicas?
 - a) Porque mide por medio de ultrasonido.
 - b) Porque se coloca al centro del canal.
 - c) Porque es muy pequeño.

2. ¿Cuál es la máxima velocidad que registra un medidor de efecto doppler?
 - a) 10 m/s
 - b) 3 m/s
 - c) 9 m/s

3. ¿Por qué el medidor puede funcionar autónomamente por largos periodos?
 - a) Porque tiene una pequeña memoria incorporada.
 - b) Porque tiene una batería de gran duración.
 - c) Porque funciona con una computadora.

4. ¿Qué sucede, actualmente, cuando un medidor de efecto doppler se descompone y requiere reparación?
 - a) Se debe arreglar
 - b) Únicamente el proveedor sabe qué hacer.
 - c) Se regresa al proveedor.

CONTENIDO

	Página
1. ¿PARA QUIÉN Y POR QUÉ? Y EVALÚA SI SABES	1
2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES	2
3. REQUERIMIENTOS DE INSTALACIÓN FÍSICA	6
4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INSTALACIÓN	9
5. PRUEBAS DE PRECISIÓN Y CALIBRACIÓN	15
6. REGISTRO E INTERPRETACIÓN DE LECTURAS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	16
7. MANTENIMIENTO BÁSICO	21
8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS	23
9. LISTADO DE PRINCIPALES PROVEEDORES	25

1. ¿PARA QUIÉN Y POR QUÉ?

¿PARA QUIÉN?

Este manual está dirigido a ingenieros, técnicos y operadores de redes de canales y en general a todos aquellos quienes están interesados en mejorar o aprender el manejo u operación de aforadores de garganta larga. Especialmente deben conocerlo quienes trabajan para la Comisión Nacional del Agua, CNA, en rutinas de inspección y verificación a quienes tienen registro de derechos de agua y cuentan con este tipo de estructuras para aforo. En México los aforadores de garganta larga se conocen con las siglas AGL.

¿PARA QUÉ?

Con este manual se pretende proporcionar al usuario la información necesaria para:

1. Identificar con facilidad un aforador de garganta larga.
2. Conocer los principios de operación y principales componentes de un aforador de garganta larga.
3. Reconocer con éxito el sitio adecuado para su instalación o construcción y su buen funcionamiento.
4. Obtener e interpretar los datos obtenidos en un aforador de garganta larga para calcular el caudal que fluye por un canal.
5. Saber las principales ventajas y desventajas.
6. Aprender los principios básicos de mantenimiento y conservación.

Para la operación de una red de canales es importante contar con un equipo o estructura apropiada para medir el caudal que fluye por el sistema con cierto grado de confianza. Los aforadores de garganta larga se han identificado como una alternativa tecnológica muy atractiva para apoyar la gestión del recurso agua en los sistemas de canales, dando como resultado un adecuado control de la dotación volumétrica.

EVALÚA SI SABES:

1. Cómo identificar un aforador de garganta larga.
2. Cómo revisar que cumple con las especificaciones mínimas.
3. Cuáles son los aforadores de garganta larga más comunes¹
4. Cómo identificar el sitio adecuado para su instalación correcta.
- 5.Cuál es la precisión de los datos obtenidos
6. ¿Qué dispositivos se emplean para medir la carga en un aforador de garganta larga? y cómo se colocan
7. Cómo calcular el caudal en un aforador de garganta larga

2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

2.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El aforador de garganta larga es una estructura rígida que forma una contracción dentro de un canal por medio de la cual se dan las condiciones hidráulicas para que se presente un flujo con régimen crítico dentro de él. Los aforadores de garganta larga, constan de un tramo convergente (contracción del canal), en donde el flujo se acelera cambiando de régimen subcrítico a supercrítico, posteriormente cuentan con un tramo recto o garganta en donde se presenta un flujo crítico que esta completamente desarrollado, y finalmente tienen un tramo divergente, en el que la velocidad del flujo disminuye rápidamente hasta formar un salto hidráulico y alcanzar nuevamente un régimen subcrítico. De esta manera dentro de la estructura se presenta una sección de control (sección con flujo a régimen crítico) que sirve de punto de partida para la medición del caudal circulante. Aguas arriba, de este tipo de estructuras, se tiene un flujo prácticamente uniforme cuya superficie libre, para un caudal constante, se mantiene estable; de esta manera es factible medir la altura de la superficie del agua con un buen nivel de exactitud.

Aguas abajo del medidor hay un canal de salida, también conocido como canal de cola, cuyos niveles asociados al rango de caudales para el que se diseña, son

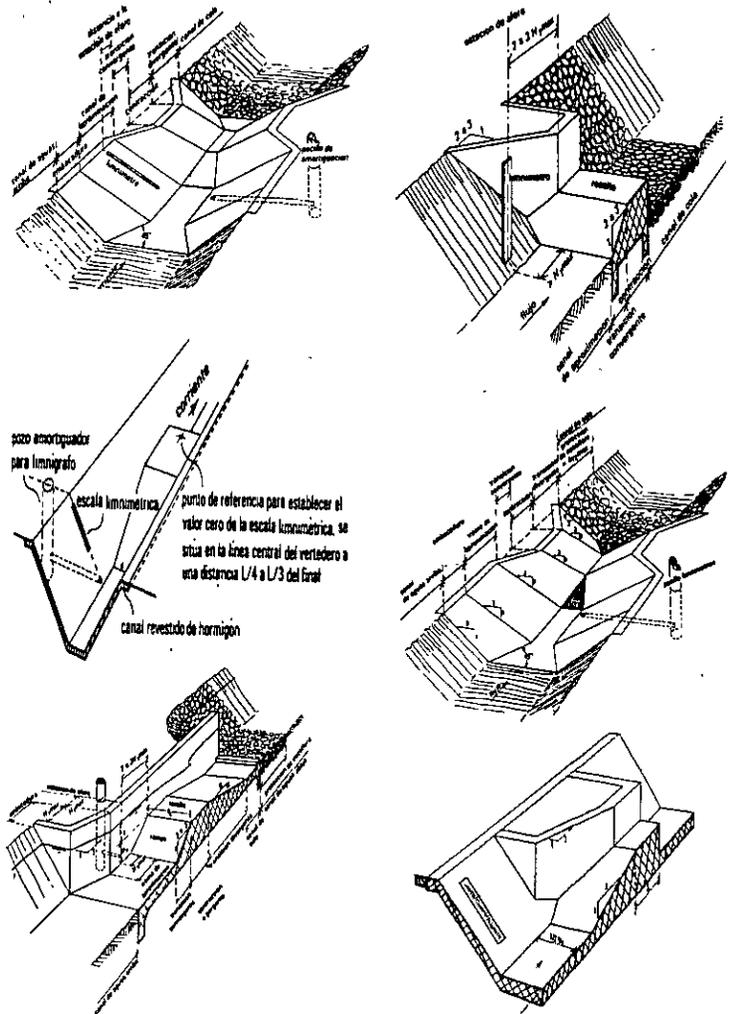


Fig. 2.1: Los aforadores pueden construirse con diferentes formas geométricas, tanto en los canales de llegada como en la sección de control y los canales de salida.

fundamentales para determinar las dimensiones del mismo.

En la actualidad existe un gran número de diseños de aforadores de garganta larga, los cuales, principalmente varían en la forma del canal de llegada, en la geometría de la sección de control y en la sección transversal del canal de salida o

de cola. Entre los más comunes se encuentran los siguientes:

1. Aforadores trapezoidales con sección divergente, contracciones laterales en la garganta y sección convergente.
2. Aforadores con resalto sin contracciones laterales conocidos

también como vertedores de garganta larga.

3. Aforador rectangular con sección convergente, sin contracciones laterales en garganta y sin sección divergente con rampa de salida.
4. Aforadores rectangulares con sección convergente, contracciones laterales en la garganta y sección divergente sin rampa de salida para canales de tierra.
5. Aforadores triangulares con sección convergente y sección divergente.

6. Aforadores rectangulares con sección convergente, contracciones en la garganta sin sección divergente ni rampa de salida para canales revestidos.

Por otro lado, la forma de la sección de control o garganta se puede diseñar con diferentes formas geométricas, entre las que se encuentran:

1. Forma circular.
2. Parabólica.
3. Trapezoidal.
4. Rectangular.

5. Otras formas más complejas.

Cada diseñado específico esta pensado para funcionar correctamente bajo ciertas condiciones tanto de cimentación como hidráulicas.

2.2 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

Los aforadores de garganta larga cuentan con varios componentes para su buen funcionamiento, entre los más importantes se tienen los siguientes:

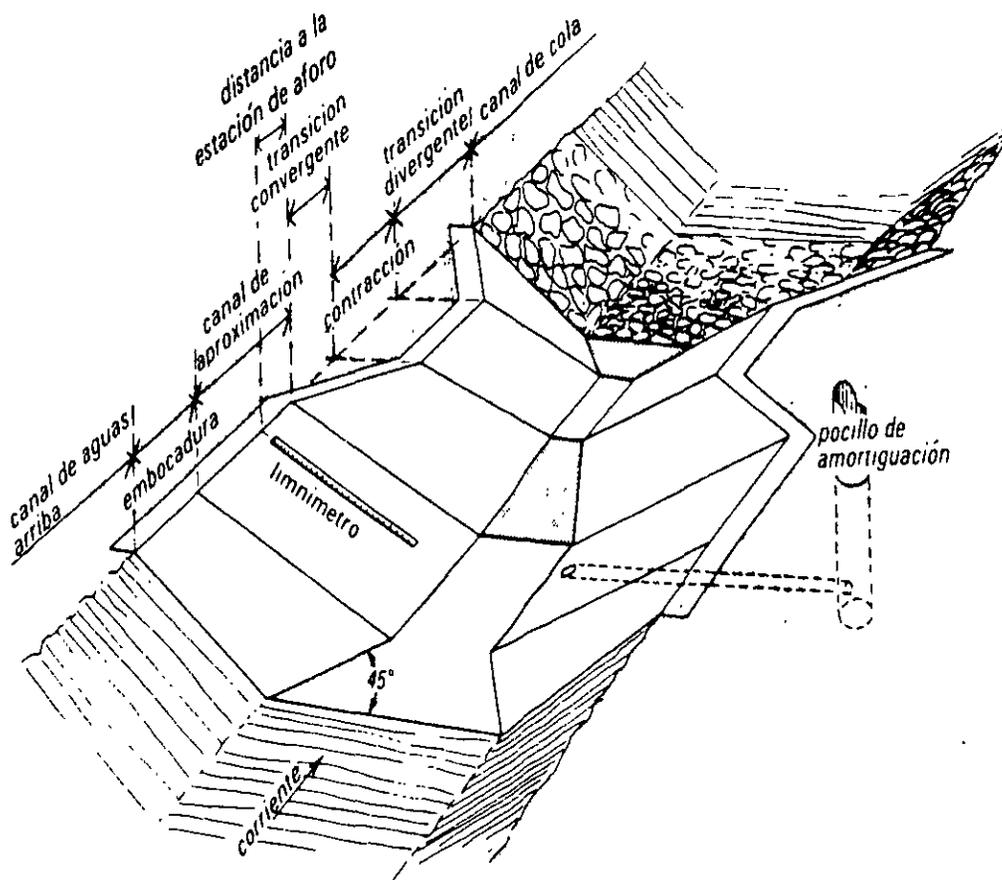


Fig. 2.2: Es importante verificar que el aforador cuente con sus principales componentes para su buen funcionamiento.

1.- Canal de Aproximación. Es la parte del aforador que se encuentra entre la sección de medición y el inicio del tramo convergente. Esta sección es necesaria para el desarrollo de las condiciones uniformes y simétricas del flujo, además de generar una superficie libre del agua estable para poder medir la altura del agua en forma exacta. La sección del canal de aproximación puede ser revestida o de tierra.

2.- Transición Convergente. Esta sección conecta al canal de aproximación con la sección de control de la estructura. La sección convergente esta formada por contracciones laterales y rampa de entrada. Las contracciones laterales pueden ser rectas, o redondeadas. En transición convergente el flujo subcrítico debe acelerarse gradualmente hacia la sección de control sin que se presenten discontinuidades o separación de flujo, obteniéndose así, líneas de flujo prácticamente paralelas.

3.- Sección de Control, Cresta, Resalto o Garganta. Es la región en la cual el flujo tiene condiciones críticas. Generalmente, este elemento se conoce como sección de control, sin embargo algunas veces también se le denomina como cresta o garganta del aforador. La sección de control debe ser horizontal en la dirección del flujo, pero en la dirección perpendicular puede usarse cualquier forma.

4.- Transición Divergente. La transición divergente es la sección por la cual sale un flujo supercrítico, reduce su velocidad disipando total o parcialmente su energía. Si es necesario disipar dicha energía, la pendiente promedio de la rampa de salida es de aproximadamente de 6 a 1. Se puede tener una transición abrupta y puede no contar con rampa de salida.

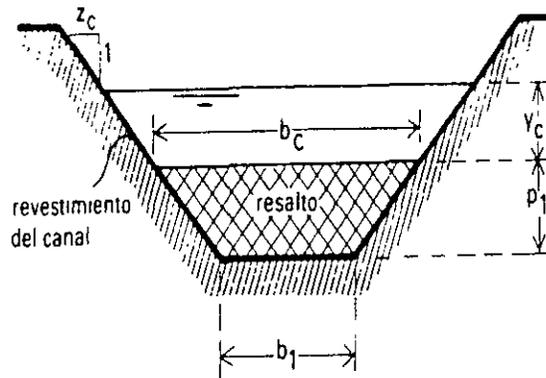
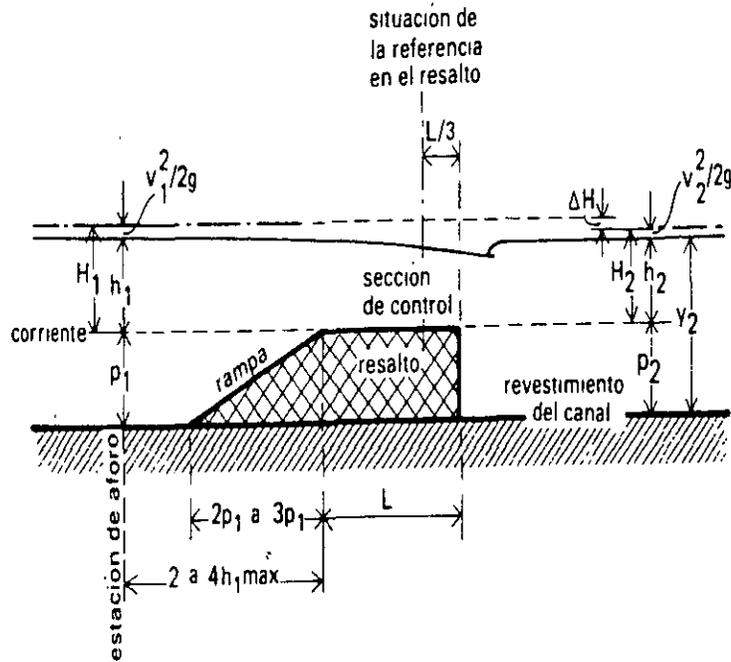


Fig. 2.3 Es igualmente importante conocer las variables más importantes de un aforador de garganta larga.

5.- Estación de Aforo o de Medición. La estación de medición se encuentra localizada en el canal de aproximación y corresponde a una zona en la que se puede medir la diferencia de elevaciones entre el nivel de agua del canal de

aproximación y el nivel del agua sobre la cresta del aforador, y se ubica aproximadamente a una distancia de entre 2 y 4 veces la altura máxima del tirante medida hacia aguas arriba a partir del inicio de la garganta del aforador. La diferencia de niveles puede medirse con

cualquier dispositivo manual o cualquier sensor automático. Las mediciones se pueden hacer directamente en el canal o en un pozo de amortiguación conectado al canal en la sección de medición.

7.- Canal de Cola o Salida. El canal de salida como su nombre lo indica, se encuentra aguas abajo del aforador. Dentro del canal de salida el nivel del agua es función de la operación del canal, del caudal y de las características hidráulicas aguas abajo del canal y de las estructuras de control. El rango de niveles de agua en esta sección del canal tiene fundamental importancia en el diseño del aforador ya que determina la elevación y el tamaño de la sección de control que se requieren para mantener las condiciones régimen modulen el aforador.

8.-Pocillo o pozo de amortiguación. Este componente se utiliza con dos fines principalmente:

1.- Facilitar el registro exacto del nivel del agua, en el punto de aforo en el cual la superficie libre del agua del canal está

agitada por remolinos u oleaje.

2.- Albergar la regleta, limnómetro o al sensor de nivel automático que se empleará para la obtención de datos de carga para calcular el caudal que pasa por el aforador de garganta larga.

Las dimensiones de la sección transversal del pozo de amortiguación dependen, principalmente, del método que se vaya a utilizar para medir el nivel del agua. Por ejemplo, cuando se desea instalar una escala limnimétrica, la longitud medida desde la superficie de la escala, no deberá ser menor del doble de la profundidad hasta el nivel mínimo del agua, esto con el fin de contar con un

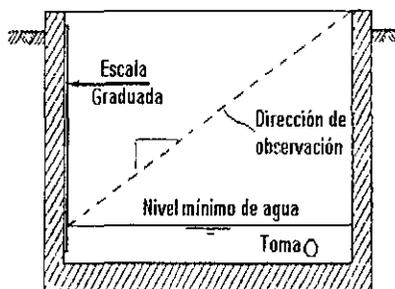


Fig. 2. 5: Cuando se requiere colocar una escala graduada en un pocillo de amortiguación se debe contar con un buen ángulo de observación.

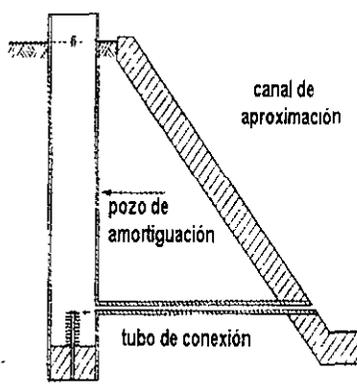


Fig. 2. 4: Contar con un pozo de amortiguación es de suma importancia cuando se tiene grandes perturbaciones en la superficie libre del agua en la sección de medición.

buen ángulo de observación. El ancho no deberá ser inferior a 0.2 m, con el fin de dejar espacio suficiente para que la escala pueda ser fijada a la pared correctamente y poder obtener lecturas de carga confiables.

3. REQUERIMIENTOS DE INSTALACIÓN FÍSICA

Todas las obras de aforo de caudales deben situarse en un tramo del canal en el cual se pueda obtener con exactitud el valor de la carga, h_1 , y donde se pueda producir una pérdida de carga suficiente para obtener una relación única de carga-caudal.

El reconocimiento del sitio potencial de instalación, o sea, el tramo de canal en donde se pretende ubicar un aforador de garganta larga, deberá cumplir con las siguientes características:

1. Consideraciones de tramo recto aguas arriba del canal aguas arriba del aforador.
2. Consideraciones de tramo libre aguas abajo de estructuras reguladora o vertedoras situadas aguas arriba del aforador de garganta larga
3. Longitud mínima de bordo libre para evitar derrames en el canal cuando se opera con el caudal máximo.

3.1 CONSIDERACIONES DE TRAMO RECTO DEL AGUAS ARRIBA DEL AFORADOR

El canal deberá tener una sección recta cuya longitud sea aproximadamente diez veces el ancho del canal y que tenga un área transversal razonablemente uniforme. Si es indispensable colocar el aforador de garganta larga cerca de una



Fig. 3.3 La importancia de seleccionar correctamente el lugar donde se construirá el aforador de garganta larga es de vital importancia para su funcionamiento correcto.

curva, se deberá tener en cuenta que la elevación de la superficie del agua en ambos lados del canal es diferente; sin embargo y afortunadamente, aun en este caso se pueden realizar mediciones razonablemente precisas siempre y cuando la longitud recta aguas arriba del canal sea superior a dos veces el ancho de la superficie libre, bajo estas condiciones se obtiene un error sistemático de alrededor del 3%. En estos casos el nivel del agua deberá ser medido en el lado de la parte interna de la curva del canal.

Para obtener una superficie libre del agua razonablemente "lisa" y para que la medición pueda obtenerse de una forma precisa, el número de Froude, Fr , debe ser menor de 0.5 a lo largo de una distancia de al menos treinta veces la

altura, h_1 , aguas arriba del aforador de garganta larga.

Siempre que sea factible, se recomienda tener un flujo con un número de Froude cercano a 0.2 en el canal de aproximación del aforador de garganta larga.

3.2 ESTRUCTURAS AGUAS ARRIBA DEL AFORADOR DE GARGANTA LARGA

El aforador debe estar localizado lo suficientemente lejos hacia aguas abajo de cualquier estructura de descarga o control (compuertas de descarga de fondo, compuertas abatibles o basculantes, compuertas radiales, etc.) que pueda provocar una gran turbulencia, esto permitirá garantizar la obtención de

mediciones confiables en el aforador. En la práctica esto significa que el aforador de garganta larga debe colocarse a más de veinte veces el ancho de la superficie del agua después de cualquier estructura. Esta condición siempre debe verificarse en campo.

Como se mencionó, el aforador de garganta larga es una estructura con una sección de control, por lo que es indispensable obtener un flujo crítico en la contracción del mismo. La formación del flujo crítico en la sección de control, requiere de una pérdida de carga mínima que, de no estar disponible, será necesario obtenerla provocando así un remanso aguas arriba del aforador. El remanso provocado por el resalto del aforador, podría provocar algunas condiciones no deseadas en la estructura que se encuentran colocadas aguas arriba del aforador. Se deberá revisar esta condición de remanso para asegurar que no tenga ninguna influencia que pueda disminuir la capacidad de operación de estas estructuras.

(canales con régimen supercrítico) y algunos más, basados en las estimaciones de los riesgos hidráulicos propios del canal. En general, y de acuerdo con el Soil Conservation Service (SCS, 1977) se recomienda que el bordo libre del canal sea, al menos, el 20% de h_{1max} ya que las velocidades de la corriente en los canales en donde pueden instalarse estos vertedores de resalto, varían en un intervalo relativamente estrecho. Se estima que, justamente a la

entrada del vertedor, es suficiente un resguardo o bordo libre de $0.2h_1$, debido a que la superficie del agua en el vertedor es estable. Esto permite un exceso de caudal de aproximadamente del 40% antes de llegar al borde superior de canal, esto sin tener en cuenta el efecto de las olas.

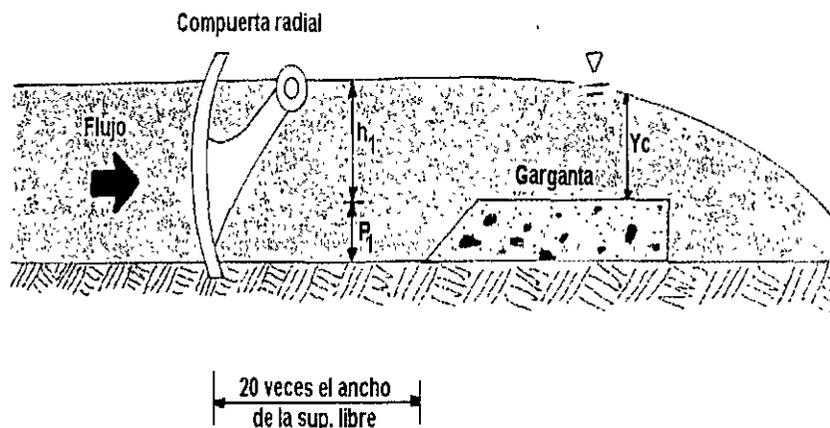


Fig. 3.4 Se debe evitar cualquier estructura aguas arriba del aforador que pudiera provocar inestabilidad en el flujo.

3.3 CONDICIÓN DE BORDO LIBRE

El bordo libre se define como la distancia entre el nivel de la superficie libre, asociada al caudal máximo de diseño, y la parte superior del canal. Con respecto al aforador de garganta larga, este parámetro es particularmente importante en el tramo del canal aguas arriba donde se tiene la influencia del remanso provocado por el resalto y las contracciones laterales del aforador.

Existen diversos criterios para la selección del bordo libre, algunos en términos de profundidad del canal, otros referidos a la carga total o tirante máximo de operación

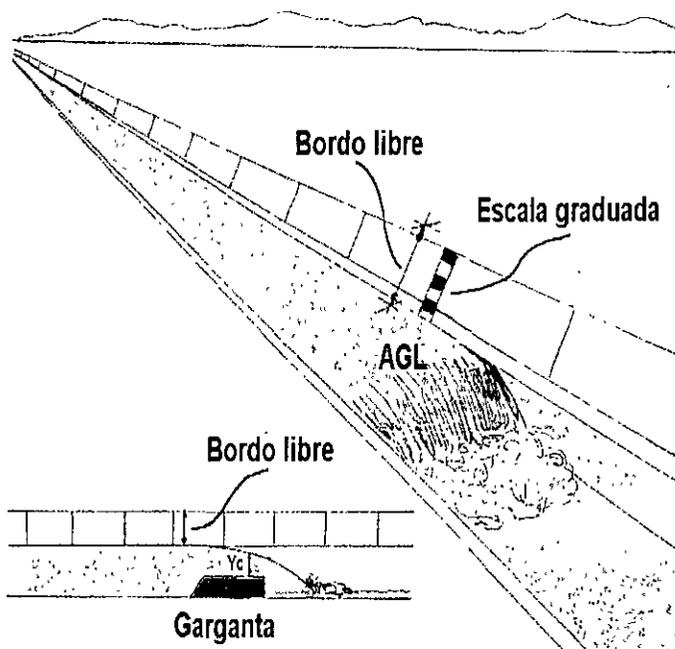


Fig. 3.5 Es importante considerar el bordo libre para evitar derrames o desbordamientos cuando se maneja el tirante máximo.

AUTOEVALUACIÓN No. 1



1. ¿Cuál es la condición de flujo en la garganta del aforador para su buen funcionamiento?
 - a) Régimen Turbulento
 - b) Régimen ideal
 - c) Régimen crítico
 - d) Régimen supercrítico
2. En que sección del aforador se obtiene un número de Froude igual a la unidad.
 - a) En el canal de salida
 - b) En la rampa de entrada
 - c) En la sección de control
 - d) En la sección de aforo
3. Con que otro nombre se le conoce a la garganta del aforador.
 - a) Bordo
 - b) Sección de aforo
 - c) Sección intermedia
 - d) Cresta
4. ¿A qué distancia a partir de l inicio de la garganta se encuentra la estación de aforo?
 - a) Entre 2 y 4 metros
 - b) Entre 2 y 4 veces $h_{1máx}$
 - c) Entre 1 y 2 veces $h_{1máx}$
 - d) Entre 1 y 2 veces p_1
5. ¿Cuál es la longitud recta mínima para instalar un aforador de garganta larga?
 - a) De 10 veces el ancho del canal
 - b) De 2 a 10 metros
 - c) De 10 veces el ancho de la cresta
 - d) De 15 a 20 veces el ancho del canal
6. ¿Cuál es la función principal de un pocillo de amortiguación?
 - a) Medir el caudal
 - b) Facilitar el registro exacto del nivel del agua
 - c) Elevar el nivel del agua
 - d) Provocar pérdida de carga
7. ¿Cuál es el porcentaje mínimo de h_1 que se recomienda para el bordo libre?
 - a) 10%
 - b) 1%
 - c) 20%
 - d) Entre 10% y 15%
8. ¿Cuál es la función principal de la sección convergente?
 - a) Provocar turbulencia
 - b) Retener sólidos en suspensión
 - c) Acelerar gradualmente el flujo
 - d) Frenar el flujo
9. En cuál de los lados se deberá realizar la medición si se tiene una curva en el canal y el aforador se encuentra instalada aproximadamente a 2 veces el ancho de la superficie libre?
 - a) En el centro del canal
 - b) En la parte externa de la curva
 - c) En la parte interna de la curva
 - d) No se puede tomar la medición.
10. ¿Cuál es el número de Froude, Fr , recomendado en la estación de aforo?
 - a) $Fr=1$
 - b) $Fr=2$
 - c) $Fr=0.5$
 - d) $Fr=0.2$
11. ¿Cuál es el ancho mínimo de un pozo de amortiguación cuando se emplea una escala graduada para medir el nivel del agua?
 - a) 2 m
 - b) 1 m
 - c) 0.6 m
 - d) 0.2 m
12. ¿Cuál es la distancia mínima después de una estructura que se encuentra colocada aguas arriba de un aforador de garganta larga?
 - a) 20% de $H_{máx}$
 - b) 10 m
 - c) 20 veces el ancho de la superficie libre
 - d) 10 veces el ancho de la superficie libre

4.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Como ya se ha indicado, al diseñar un aforador de garganta larga se debe tener en mente que se trata de un aforador de sección crítica, por lo que es indispensable que ésta se presente en la garganta; de lo contrario no funcionará en forma correcta y no será más que una obstrucción dentro del canal que puede provocar un remanso, algo de turbulencia o algún otro efecto indeseable. La formación de la sección crítica en la garganta como también ya se ha señalado requiere de una pérdida de carga mínima entre el canal de aproximación y la sección de control que, de no estar disponible, impedirá la formación de la citada sección crítica.

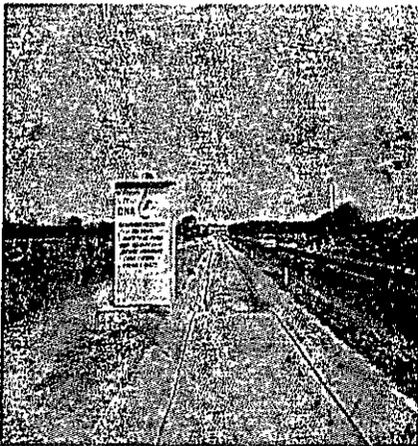


Fig. 4.1 Es muy importante tener en cuenta todas las especificaciones técnicas para diseñar correctamente un aforador de garganta larga.

Esto significa que después de dicha sección de control, de ser necesario, se debe contar con una sección para

convertir la energía cinética en energía potencial.

4.1 PÉRDIDA DE ENERGÍA DISPONIBLE EN UN AFORADOR DE GARGANTA LARGA

Para obtener la pérdida de energía total, se recomienda estudiar, por separado, las diferentes partes del aforador, en las que se pierde energía por diferentes razones. Las tres principales secciones en que se divide un aforador para evaluar las pérdidas de energía son:

1. Pérdidas de carga entre la sección de aforo y la sección de control.
2. Pérdidas entre la sección de control y la sección del canal de salida.
3. Pérdidas debidas a la conversión incompleta de energía cinética a energía potencial en la transición de salida del aforador.

Las Pérdidas de carga entre la sección de aforo y la sección de control son pérdidas se deben principalmente al rozamiento y a la aceleración de la corriente. Estas pérdidas pueden evaluarse según Bos (1976) y Bos y Reinink (1981) con la siguiente ecuación:

$$H_1 - H_c = H_1 \left(1 - C_d^{1/u} \right)$$

Donde H_1 es la carga en la sección uno, H_c es la carga en la sección crítica, C_d es el coeficiente de caudal el cual es una función del H_1/L ($0.1 \leq H_1/L \leq 1.0$) y u es el exponente de h_1 en la ecuación de caudal.



4.1 Saber como evaluar las pérdidas en un aforador de garganta larga es parte importante del diseño de un aforador de garganta larga.

Tabla 4.1 Valores de u

Forma de la sección de control	Exponente, u , de h_1
Rectangular	1.5
Trapezoide medio o parábola media	2.0
Triangular	2.5

Las pérdidas entre la sección de control y la sección del canal de salida en donde se mide h_2 . Aún cuando en la transición de salida el flujo que se presenta es variado, se puede emplear la ecuación de Manning, la ecuación de Chezy o la de resistencia de capa límite para calcular las pérdidas causadas por el rozamiento.

Ecuación de Manning:

$$\Delta H = \frac{n L V^2}{C_u^2 R^{4/3}} = \frac{L V^2 n^2}{R R^{1/3}}$$

Ecuación de Chezy:

$$\Delta H = \frac{L v^2}{C^2 R} = \frac{L v^2}{R C^2}$$

Ecuación de resistencia de capa límite:

$$\Delta H = \frac{C_f L v^2}{2gR} = \frac{C_f L v^2}{2g R}$$

Donde:

Símbolo	Variable
ΔH	pérdida de carga debida al rozamiento
V	velocidad media
R	radio hidráulico (área/perímetro mojado)
C	factor de Chezy
n	factor de Manning
C_u	coeficiente unitario para el valor, n, de Manning
C_f	coeficiente de resistencia
g	aceleración de la gravedad
L	longitud en la dirección del flujo

Las pérdidas debidas a la conversión incompleta de energía cinética a energía potencial en la transición de salida del aforador son iguales a las pérdidas de energía totales menos las pérdidas por fricción en la sección de transición de salida.

4.2 LÍMITE MODULAR

Se llama sumergencia a la relación entre la carga H_2 que tiene el flujo inmediatamente aguas abajo del aforador y la carga H_1 que se presenta justo aguas

arriba del mismo. Para valores bajos de la relación H_2/H_1 , o sea, para valores menores que la unidad, el aforador no se ahoga y por consecuencia el valor de H_2 no influye en la relación entre el tirante aguas arriba (h_1) y el caudal que circula por el aforador. Bajo estas condiciones se dice que se tiene régimen modular en el aforador. Por el contrario cuando la relación de sumergencia H_2/H_1 es mayor que la unidad, el flujo en la garganta se ahoga y no se presenta el régimen crítico, de modo que el caudal que pasa por el aforador se ve influenciado por el valor de H_2 y por consecuencia no hay una relación única entre el tirante aguas arriba del aforador, h_1 , y el caudal que pasa por él, Q. Bajo estas condiciones se dice que el régimen no es modular. La relación de sumergencia para que el régimen modular

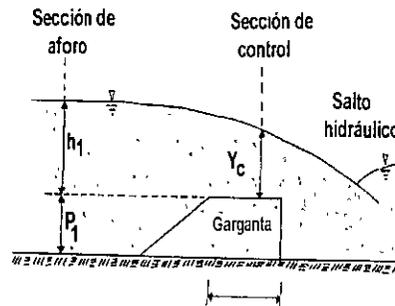


Fig. 43: Un límite modular menor que la unidad conduce a un buen diseño de un aforador de garganta larga evitando que éste se ahogue.

pase a ser no modular se denomina límite modular.

El límite modular debe calcularse para cada conjunto de caudal-tirante y, asimismo, se debe revisar si el tirante en el canal de salida no sobrepasa el valor marcado por el límite modular. Para que

se salvaguarde el valor marcado por el límite modular, en muchos casos es necesario elevar la garganta del aforador, o sea, poner un escalón para provocar un remanso que aumente la energía potencial (carga H_1) antes de entrar al aforador y lograr así, por lo menos, la pérdida de carga que marca este límite.

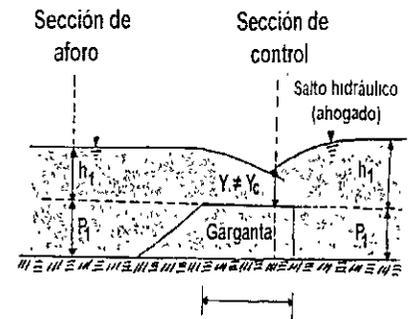


Fig. 43: Valores mayores que uno de la relación H_2/H_1 conducen a diseños deficientes provocando que el salto hidráulico afecte la sección de control evitando así la formación de las condiciones críticas en la sección de control.

En tal caso se recomienda revisar que el canal tenga la capacidad de conducir el caudal máximo sin desbordarse.

El diseño de la estructura de aforo implica minimizar la pérdida de carga; para esto se recomienda mantener los tirantes, que se marcan como máximos en el límite modular, lo más cerca posible de los tirantes que se dan en forma real en el canal de salida. Así se logra una pérdida de carga mínima y se garantiza el buen funcionamiento del aforador. Con el fin de tener una idea de las pérdidas máximas ($\Delta H_{\text{máx}}$) que comúnmente se producen con diferentes secciones de la garganta del aforador de garganta larga (sección de

control), se presenta una tabla elaborada por Bos, Replogle y Clemmens (1986).

Tabla 4.2 Pérdidas máximas de carga que se producen en un AGL y límites modulares recomendados

Forma de sección de control	Límite modular mínimo, H_2/H_1	Pérdida de carga máxima, $\Delta H_{m\acute{a}x}$
Rectangular	0.60	$0.4H_1$
Trapezoidal y parabólica	0.70	$0.3H_1$
Triangular	0.76	$0.24H_1$

Es importante hacer notar que si el nivel a la salida del aforador es menor que el registrado con el tirante crítico que se presenta dentro de la garganta, entonces no será necesario construir una transición de salida.

Por otro lado, si se tiene suficiente desnivel como para absorber sin problemas la energía cinética del flujo aguas debajo de la cresta del aforador, por ejemplo, una caída inmediatamente aguas abajo de la estructura; en estos casos normalmente resultará que el nivel de los tirantes que satisfacen el límite modular estará muy por encima de los que correspondan al canal de salida, lo que implica que la condición impuesta por el límite modular esté más que asegurada; sin embargo, bajo estas condiciones puede llegar a ser necesario el colocar alguna estructura disipadora de energía. En este caso es fácil inferir que no es necesario elevar la garganta para mantener un flujo modular o generar un remanso para ganar carga; tal vez, la garganta pueda ponerse incluso al nivel de la plantilla, lo que daría como resultado una curva de desagüe. Bajo dichas condiciones, el flujo modular está prácticamente asegurado, por esta razón

se puede variar la altura de la garganta y seleccionar la más conveniente. En este caso se recomienda mantener números de Froude menores de 0.5.

4.3 GARGANTA O RESALTO

El resalto de aforador de garganta larga, es la parte más importante de un aforador de garganta larga, por lo cual se debe construir con una gran precisión. Una desviación de un grado con respecto a la horizontal en la dirección del flujo, puede generar un error de hasta el 3% en las lecturas del aforador. Para obtener un diseño adecuado de esta sección se recomienda tomar en cuenta las siguientes condiciones:

- 1.- Se debe construir con una longitud mínima, para mantener las líneas de corriente en forma prácticamente

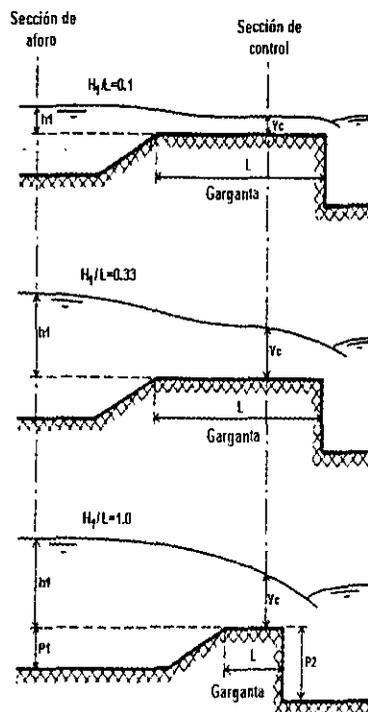


Fig. 4.5: La longitud (L) y la altura (P_1) de la garganta, son muy importantes para el diseño correcto de un aforador de garganta larga.

paralelas al flujo.

- 2.- La garganta no debe ser demasiado larga para no provocar inestabilidades, ya que el flujo en la garganta es muy cercano al crítico. En la práctica se ha encontrado que un aforador de garganta larga funciona correctamente si la relación H_1/L se mantiene entre 0.1 y 1.0. Tomando en cuenta esto es conveniente revisar para todo el rango de caudales considerados que la longitud de la garganta del aforador se encuentre dentro de estos límites. No obstante a los límites marcados anteriormente, por cuestiones de precisión, es recomendable que dicho rango se mantenga, si esto posible, entre 0.35 y 0.75, ya que en la práctica se ha observado que, en ciertos casos, la precisión de las mediciones aumenta obteniéndose en general un error del 2%. Mientras que para los límites superior e inferior, 1 ó 0.1, respectivamente, se tiene un error aproximado del 5%.
- 3.- La altura de la garganta debe ser lo suficientemente elevada para que el flujo se mantenga modular, tanto para el gasto mínimo como para el máximo.
- 4.- El resalto debe ser lo suficientemente alto para proporcionar, aguas arriba, una superficie estable del agua que permita leer la altura de la carga, h_1 , con la precisión deseada.
- 5.- La altura del resalto debe ser lo bastante baja para que no se produzcan desbordamientos en el canal aguas arriba.

6.- El resalto debe ser lo suficientemente bajo como para que no se vea reducida la capacidad de los aforadores que se encuentran instalados aguas arriba del mismo.

7.- En donde se tengan problemas de sedimentos, la altura de la garganta debe ser lo suficientemente baja para no agravar los problemas de sedimentación de materiales.

8.- Para reducir los costos de construcción, el resalto deberá ser lo más bajo y corto posible, dentro de los límites prácticos.

4.4 TRANSICIÓN DE ENTRADA

La mayoría de las estructuras de medición o de regulación cuentan con una transición convergente, en la mayoría de los aforadores de garganta larga se cuenta con una rampa de entrada (si es que existe escalón) y una sección convergente lateral, entre otras funciones la transición de entrada tienen como función principal asegurar que las líneas de flujo sean prácticamente rectas, lo cual permitirá que se pueda realizar una calibración analítica del aforador.

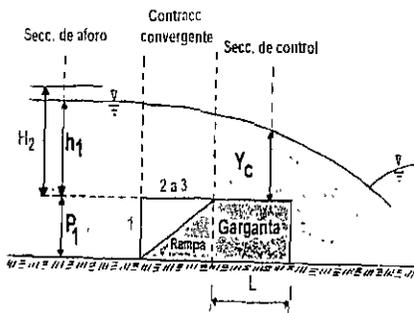


Fig. 4.6 Cuando el aforador cuenta con un resalto es indispensable una rampa aguas arriba de este.

Los valores recomendados para la rampa de entrada del resalto o pendiente de entrada se encuentran entre 2:1 y 3:1. Estas mismas relaciones se deben mantener para la sección de convergencia lateral.

4.4 TRANSICIÓN DE SALIDA

La máxima pérdida de energía ocurre en la transición de salida del aforador donde el flujo crítico regresa a su estado subcrítico. La magnitud de la pérdida de energía depende en gran medida de la forma de la transición de salida, de la brusquedad del cambio de secciones y, por lo tanto, de la velocidad de salida del fluido. Cuanto más suave sea el cambio, menor será la pérdida de energía. Según Bos, Replogle y Clemmens (1986) existe un vínculo de tipo empírico entre la carga de velocidad y la relación de expansión de la transición de salida que determina la pérdida de carga mínima requerida para mantener un flujo libre o modular. De esta manera, se ha encontrado que para diferentes relaciones de expansión en la transición aguas abajo, ciertos valores mínimos del límite modular para las

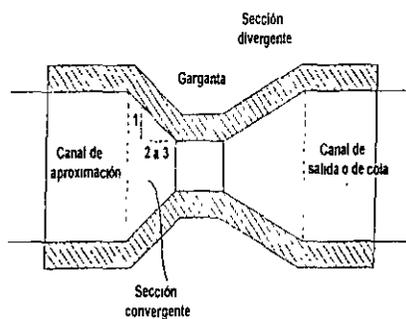


Fig. 4.7 La sección convergente lateral no es indispensable, pero es importante para asegurar que las líneas de flujo sean paralelas en la sección de control y evitar la acumulación de materiales en suspensión.

secciones de control más comúnmente empleadas (Bos, Replogle y Clemmens, 1986).

Tabla 4.3 Relación de expansión de salida y límite modular en aforadores con garganta elevada

Relación de expansión m:1	Límite modular	
	Sección de control rectangular	Sección de control trapezoidal
0:1	0.70	0.75
1:1	0.72	0.77
2:1	0.74	0.80
4:1	0.77	0.83
6:1	0.79	0.85
10:1	0.80	0.87

Tabla 4.4 Relación de expansión de salida y límite modular en aforadores de fondo plano

Relación de expansión m:1	Límite modular	
	Sección de control rectangular	Sección de control trapezoidal
0:1	0.74	0.80
1:1	0.74	0.80
2:1	0.77	0.83
4:1	0.80	0.86
6:1	0.82	0.88
10:1	0.84	0.90

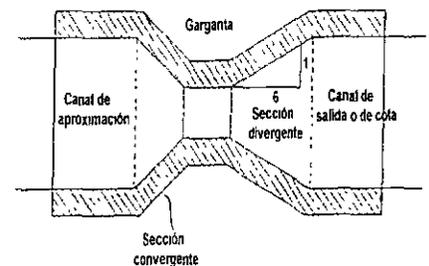


Fig. 4.8 La sección divergente aguas abajo del aforador evita la formación de remolinos, ayudando así a la conversión de energía cinética en energía potencial.

Por otro lado, se tiene que la rampa de salida y sección de transición divergente lateral, no son indispensables para el buen funcionamiento de un aforador de garganta larga cuando la carga a la salida del aforador, H_2 , sea menor que la profundidad crítica en la sección de control, y_c , es decir, la pérdida de carga disponible, $H_1 - H_2$, sea mayor que la pérdida de carga entre la sección de aforo y la sección de control, $H_1 - y_c$:

$$H_1 - H_2 > H_1 - y_c$$

En otras palabras no es necesario transformar la energía cinética de la sección crítica en energía potencial aguas abajo del aforador. Sin embargo, cuando es absolutamente necesario contar con una transición de salida. Para convertir dicha energía cinética en energía potencial aguas abajo del aforador, se recomiendan transiciones graduales de 4:1 y 6:1 (Bos, Replögge y Clemmens, 1986), tanto en la rampa como en la sección divergente lateral. Las relaciones de 1:1 ó 2:1 no son recomendables para la conversión de energía en la transición de salida, ya que la velocidad de los chorros para estas relaciones es muy alta y las líneas de corriente no pueden cambiar de dirección repentinamente para adaptarse a las paredes de la transición de transición, lo cual conduce a la formación de remolinos y vórtices que convierten parte de la energía cinética en calor y ruido.

En casos especiales cuando se requiere una rampa de salida y la longitud disponible del canal aguas abajo del aforador, es insuficiente para adaptar una transición gradual completa, se recomienda trincar la transición antes de que usar una transición más brusca. Por ejemplo, el limitar una transición a la

mitad de su longitud total tiene un efecto despreciable en el límite modular de la estructura. El corte de dicha transición no debe redondearse, ya que esto podría provocar pérdidas adicionales de carga y

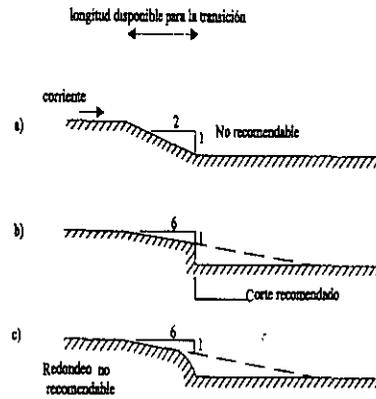


Fig. 4.9: Es importante contar con una rampa de salida cuando se requiere convertir la energía cinética en energía potencial aguas abajo del aforador de garganta larga.

erosionar el canal.

4.6 SECCIÓN DE MEDICIÓN O ESTACIÓN DE AFORO

El punto de medición deberá colocarse lo suficientemente lejos, aguas arriba, del aforador, para que se encuentre fuera de la zona de descenso de la superficie del agua, pero lo suficientemente cerca para que la pérdida de carga sea despreciable.

La distancia al punto de medición, tomada desde el inicio de la transición hacia aguas arriba, debe ser mayor o igual a la carga máxima total en dicho punto (considerando la carga con caudal máximo). Con frecuencia se toma como referencia el borde de la garganta o

resalto aguas arriba, en este caso se recomienda que la distancia al pinto de medición sea de dos o cuatro veces la carga máxima, h_1 .

En la sección de aforo se pueden emplear diversos dispositivos para medir la carga hidráulica, sin embargo, independientemente del dispositivo o

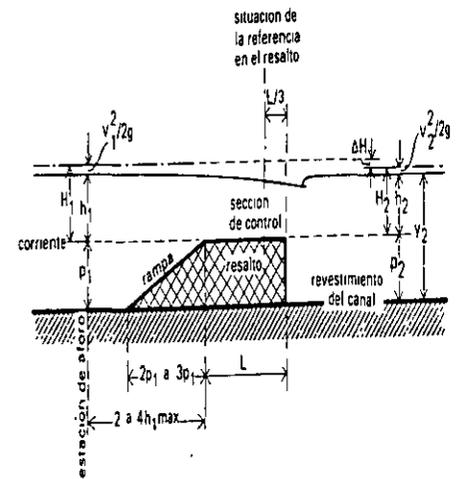


Fig. 4.10: La sección de aforo o de medición debe localizarse lo suficientemente lejos de la sección de control para evitar que carga dentro de la zona de descenso de la superficie del agua, pero lo suficientemente cerca para que la pérdida de carga sea mínima.

método que se emplee, es indispensable que éste se coloque de tal manera que no obstruya el flujo, evitando así que el patron de flujo en la garganta sea afectado.

4.7 CONTRACCIÓN LATERAL

El diseño más sencillo de un aforador de garganta larga es el que tiene únicamente contracción en el fondo (resalto) y no cuenta con contracciones laterales en la garganta. Este tipo de aforadores de garganta larga provoca pérdidas de carga muy bajas, debido a que se presentan tirantes pequeños en la sección de medición. Sin embargo, si se considera que para el rango completo de caudales a medir la escala correspondiente tiene un desarrollo igual a la variación de los tirantes en la sección de medición, ello define un incremento sobre la escala para cada litro por segundo escurrido. Si este incremento, no fuera suficiente grande para lograr la precisión deseada, se deben agregar una contracción lateral al aforador para lograr esta precisión.

La contracción lateral hará que el rango de variación de tirantes respecto al caudal se incremente y con ello aumentará también la pérdida de carga y muy probablemente se tenga que acompañar de una reducción en la altura del escalón o resalto para no rebasar el bordo libre del canal con el nuevo remanso aguas arriba.

Las dimensiones de la contracción lateral deben calcularse por ensayo y error, tomándose en cuenta la precisión deseada, las pérdidas de carga, los tirantes máximos aguas arriba permitidos en el canal y los tirantes necesarios aguas abajo del aforador para asegurar un flujo modular.

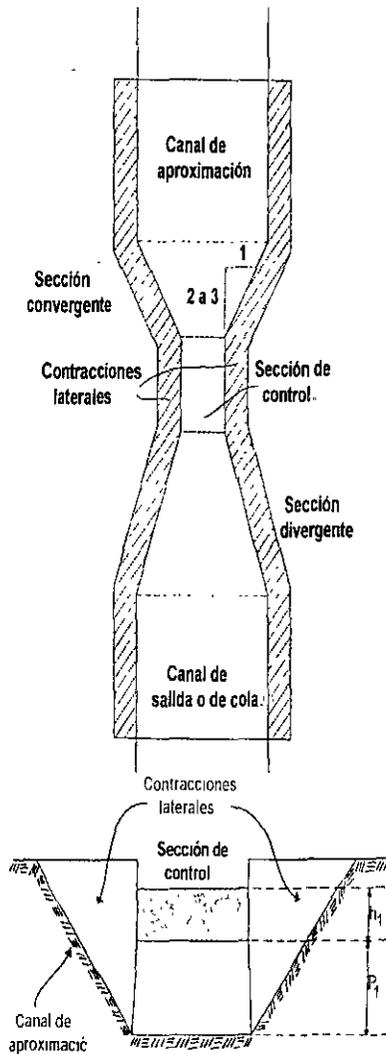


Fig. 4.11 Las contracciones laterales son importantes cuando se requiere que los incrementos tirantes en la sección de medición sean mayores para variaciones pequeñas en los caudales.

5. PRUEBAS DE PRECISIÓN Y CALIBRACIÓN

En la medición de flujo en canales abiertos frecuentemente se usan estructuras de flujo crítico. La mayoría de ellos requieren ser calibrados en laboratorio debido a que la descarga es teóricamente impredecible, excepto a través de coeficientes obtenidos empíricamente, como son los coeficientes de caudal, C_d y de velocidad C_v . Existe dos tipos de dispositivos cuyas descargas pueden ser predichas analíticamente sin la necesidad de coeficientes, uno de ellos es el aforador de garganta larga y el otro es el vertedor de cresta larga, este último es un caso especial de aforador de garganta larga, pero ambos tienen propiedades hidráulicas similares.

En una gran cantidad de situaciones, y en particular para el diseño de aforadores de grandes dimensiones, se requiere hacer un diseño especial para cada caso. Bajo esta condición se tiene que el principal problema es la obtención de la curva de calibración asociada a una propuesta específica de tipo y altura de la garganta del aforador. Para solucionar esta problemática y obtener la función caudal-tirante medido se cuenta con dos métodos (Martínez y Castillo, 1992):

- *El de los coeficientes.* En este caso, el caudal está en función de la carga sobre la garganta; se considera igual la carga en la garganta y en la sección de medición. Se plantea la ecuación de la energía y se despeja el caudal en función del tirante medido, aplicándose después coeficientes de corrección para la

pérdida de carga, velocidad de llegada al canal y forma de la garganta.

- *El de integración numérica.* Se calcula el perfil del flujo en tramos pequeños, desde el punto de la desembocadura de la garganta, donde se presenta el tirante crítico, hasta la sección de medición del tirante. En este caso se resuelve la ecuación de la energía con el término de pérdidas incluido.

Para estimar las pérdidas por cortante, debido a que los tramos considerados son muy cortos y ha que se requiere de una buena aproximación numérica, en los métodos anteriores se emplean las ecuaciones de la teoría de capa límite.

Es importante hacer notar que existen diversos programas de cómputo ya validados que realizan de manera sistemática los cálculos de calibración y que de hecho permiten realizar el diseño de un aforador considerando una serie de alternativas posibles, de aquí que se recomienda el uso de este tipo de herramientas para el diseño y calibración de aforadores de garganta larga.

6. REGISTRO E INTERPRETACIÓN DE LECTURAS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para poder estimar el caudal que pasa por un aforador de garganta larga con exactitud es necesario conocer la altura de la carga, referida al nivel de la garganta en la sección de control. De hecho la importancia de su medición, es tal que, con mucha frecuencia, el éxito o fracaso de una estructura de este tipo depende completamente de la eficacia del equipo de medición que se utilice.

La medición de la ya citada carga para calcular el caudal, se realiza en la sección de aforo o estación de aforo; se puede llevar a cabo tanto en forma manual como por medio de sistemas automáticos, que permiten medir la carga instantánea y calcular el caudal e integrarlo para cuantificar el volumen durante un intervalo de tiempo determinado.

El nivel de referencia de la garganta para medir la carga, se toma en la sección de control, que como ya se mencionó con anterioridad, se encuentra localizado a una distancia de aproximadamente, $L/3$, del borde de la cresta aguas abajo. En el caso de que la superficie de la garganta tenga pequeñas ondulaciones, se recomienda tomar, como verdadero nivel de referencia de la sección de control, el nivel medio de dicha sección, para evitar grandes errores en la medición.

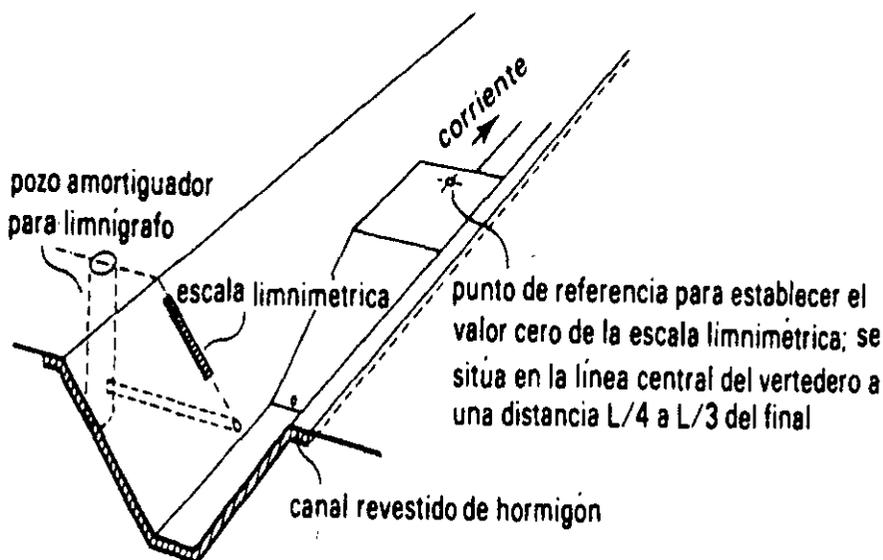


Fig. 6.1 El nivel cero de la sección de aforo debe referenciarse con respecto al nivel cero de la sección de control localizado sobre la garganta del aforador de garganta larga.

Para la selección del dispositivo de medición existen tres factores importantes que se deben tener en cuenta:

1. Frecuencia de medición de la altura de la carga.
2. El error tolerable en la medida de la altura de la carga.
3. El tipo de aforador sobre el cual se quiere medir la carga.

6.1 REGISTRO DE DATOS CON ESCALAS GRADUADAS O LIMNÍMETROS

El nivel del agua puede medirse con un limnímetro o con una escala graduada, vertical o inclinada, los cuales pueden colocarse directamente sobre el canal o en un pozo de amortiguación. Este tipo de instrumentos se emplean cuando no se requiere una alta precisión en las lecturas

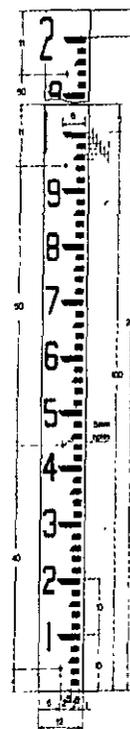


Fig. 6.2 Las escalas limnimétricas pueden graduarse en unidades de longitud o en unidades de caudal.

y la medición del caudal es esporádica. Las escalas pueden graduarse en centímetros, pulgadas o aún mejor directamente en unidades de caudal como son l/s ó m³/s, etc. Cuando, el dispositivo de medición se coloca directamente en el canal es importante que este sea instalado de tal forma que no interfiera con las líneas de flujo.

Es importante tener en cuenta que existe una diferencia entre la escala colocada verticalmente y aquella colocada en forma inclinada sobre el talud del canal. Esta última indicará una longitud mayor que la correspondiente longitud vertical, h_1 , por lo que es importante siempre tener en cuenta esta diferencia.



Fig. 6.3 Es importante saber si los datos de carga están referidos a una longitud vertical para poder calcular el caudal correctamente. De lo contrario será necesario convertir los datos a altura de carga vertical.

Por ejemplo, para convertir las lecturas tomadas en una escala inclinada en altura, h_1 , para calcular el caudal es indispensable conocer la relación del talud del canal sobre el cual se encuentra colocada dicha escala.

Tabla 6.1 Valores de cargas referidas en escalas verticales y horizontales, para un canal con taludes de 1.5:1.

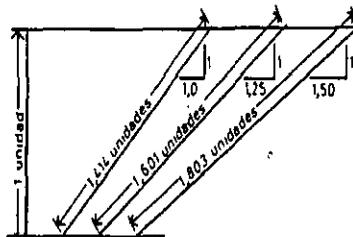


Fig. 6.4 El factor de conversión de unidades en una escala inclinada en unidades verticales es igual a $\sqrt{1+Z^2}$.

Caudal, Q (m ³ /s)	Altura de carga vertical, h_1 (m)	Altura de carga sobre el talud, h_t (m)
0.276	1.40	2.524
1.645	1.60	2.885
2.608	1.70	3.065
3.758	1.80	3.245
5.094	1.90	3.426
6.616	2.00	3.606

Quando se usan escalas o limnímetros para registrar las cargas, se emplean tablas o gráficas de calibración para calcular el caudal que fluye a través del aforador de garganta larga. Por ejemplo, para un aforador de garganta larga que tiene una curva de calibración como la que se muestra en seguida, si puede

obtener el gasto a partir de la lectura tomada en la escala vertical. Para una carga de 1.8 m, se observa que corresponde a un caudal de 3.75 m³/s, aproximadamente.

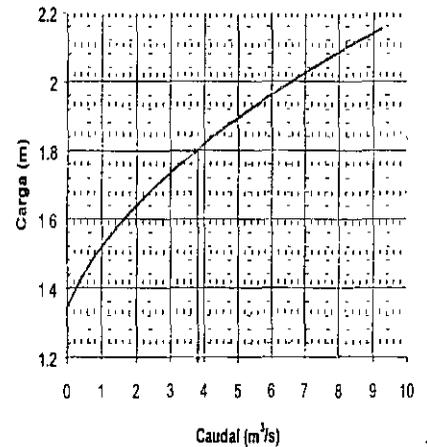


Fig. 6.5 Para cada diseño en particular existe una gráfica o tabla de aforo única.

6.2 REGISTRO DE DATOS CON SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Por otro lado, el uso de registradores automáticos, se recomienda cuando:

1. El caudal en el canal oscila con mucha frecuencia durante el día y se requiere determinar el caudal medio diario y el volumen total.
2. La frecuencia de medición de la carga para calcular el caudal es muy alta.
3. Se requiere de una gran precisión en las lecturas.
4. Se requieren efectuar mediciones en puntos muy lejanos.

5. Se desea medir en lugares donde no se tiene acceso durante ciertas condiciones meteorológicas.

Los sistemas automáticos a diferencia de los sistemas manuales, tienen la capacidad de mostrar los datos en forma digital en una pantalla de cristal líquido en tiempo real y, como ya se mencionó anteriormente pueden guardar el registro histórico de todos estos datos. Estos sistemas siempre requieren de una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento continuo, el cual puede ser desde una batería hasta un panel solar.

Con frecuencia este tipo de registradores automáticos se emplean cuando el objetivo principal, es obtener el volumen totalizado en ciertos periodos programados.

Los sistemas automáticos, requieren principalmente de los siguientes elementos:

1. Sensor de nivel o carga, el cual puede ser hidrostático o de tipo ultrasónico.
2. Circuito electrónico para transformar la señal del nivel del agua registrado por el sensor en altura de carga referida al nivel de la sección de control y calcular el caudal con la ecuación que describe el tipo de estructura de que se trate.
3. Circuito electrónico totalizador para calcular el caudal en intervalos preestablecidos, multiplica el caudal por el tiempo transcurrido y calcula el volumen total, el cual almacena en un sistema de memoria.

4. Sistema de almacenamiento de datos o memoria, este puede ser tan grande como se requiera. Para almacenar pequeñas cantidades de datos normalmente este sistema se encuentra incluido en el circuito electrónico, sin embargo para almacenar grandes cantidades de datos se requiere de un sistema externo como son los dataloggers.

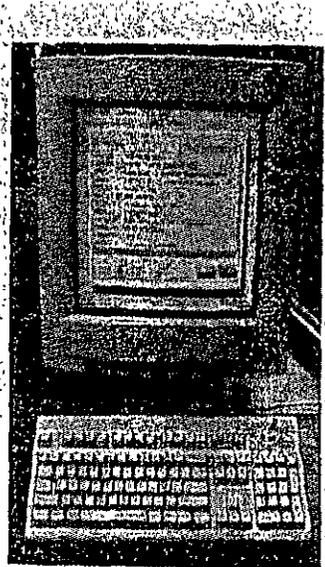
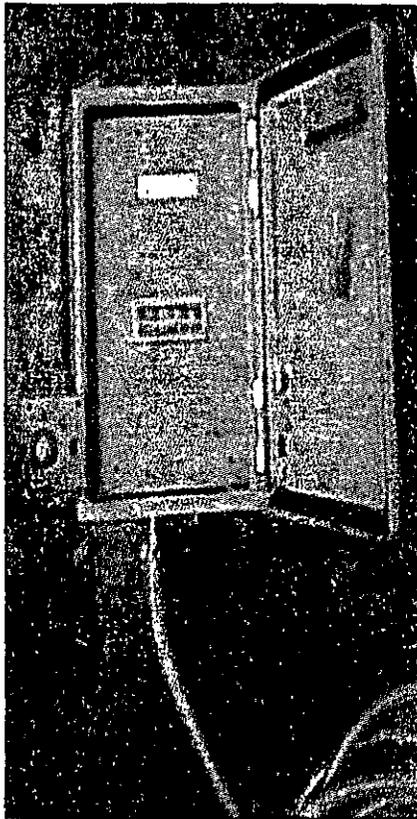
Las variables registradas pueden obtenerse a través de diferentes medios:

1. Impresoras.
2. Pueden observarse directamente en una pantalla de cristal líquido.
3. Pueden descargarse como archivos de datos con diferentes formatos (*.txt, ASCII, *.prn, etc.) a través de un puerto serial por medio de una computadora personal (portátil) para generar gráficas de carga y caudal instantáneo, por hora, día, mes y hasta anual.

Pantalla de Cristal
Líquido y Datalogger

Computadora

Salida de
Datos



Hidronica S.A. de C.V.
Archivo con datos del medidor N° 0588
de 12 Pulgadas
Lunes 7 de Diciembre de 1998 (18:59 hrs.)
Gasto Instantáneo (lts/seg):
0,000,000,056.700
Volumen por minuto (lts/mn):
0,000,000,000,003,378.84
Volumen por hora (lts/hr):
0,000,000,000,003,436.15
Volumen diario (m³/día):
0,000,000,000,003.55008
Volumen por mes (m³/mes):
0,000,000,001,346.65296
Volumen por año (m³/año):
0,000,000,001,346.71027

Fig. 6.6 Cuando se usa un sistema automático es importante contar con los componentes básicos: Sistema de adquisición de datos, sistema de procesamiento de información, almacenamiento y despliegue de datos.

Entre los sensores de nivel más comúnmente empleados en los sistemas de adquisición de datos automáticos para aforadores de garganta larga, se encuentran los sensores de presión y los ultrasónicos.

6.2.1 SENSORES DE PRESIÓN

Los sensores de presión, siempre deben colocarse en un pozo de amortiguación al mismo nivel que la sección de control. Cuando se usan este tipo de sensores es importante verificar que el agua no contenga ácidos o agentes corrosivos que dañen prematuramente los componentes del sensor de presión. También es muy importante que todas las conexiones hidráulicas queden perfectamente selladas, para evitar fugas que pudieran provocar lecturas de datos erróneos.

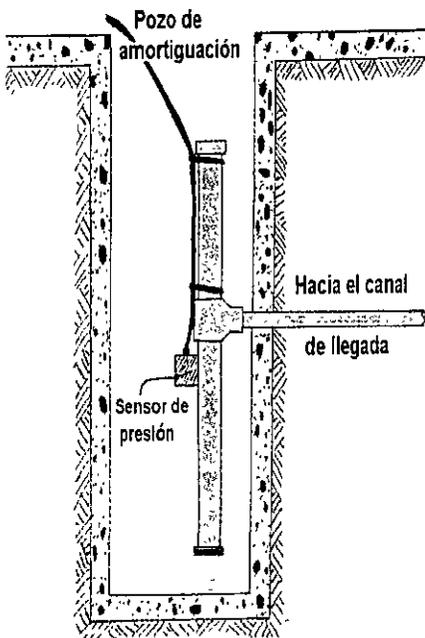


Fig. 6.7: Los sensores de presión son muy efectivos cuando el fluido no contiene ácidos u otros agentes corrosivos.

6.2.2 SENSORES DE NIVEL ULTRASÓNICOS

Por otro lado, tenemos que los sensores de nivel ultrasónicos son más versátiles ya que pueden colocarse tanto en un pozo de amortiguación como los sensores de presión o directamente sobre el canal generando datos con la misma precisión.

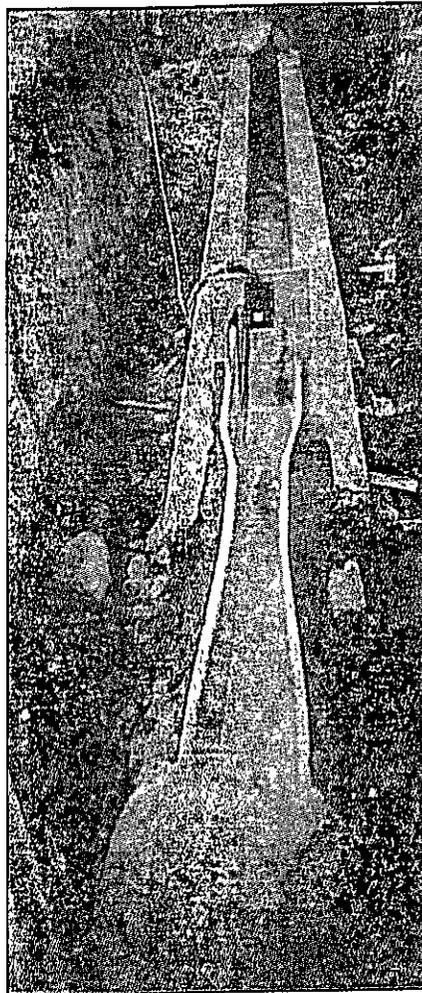


Fig. 6.8: Por otro lado, se han empleado sensores de nivel ultrasónicos en aforadores de garganta larga con gran éxito.

7. MANTENIMIENTO BÁSICO

El buen funcionamiento de los aforadores de garganta larga igual que todas las estructuras de aforo o de control depende en gran medida del cuidado que se tenga durante su construcción. Un diseño adecuado y una buena construcción evitará el depósito de sedimentos en el canal de llagada, evitará que el material en suspensión quede atrapado en la zona de convergencia o sobre la misma cresta del aforador. Sin embargo como en cualquier dispositivo de medición se requiere de un mantenimiento básico.

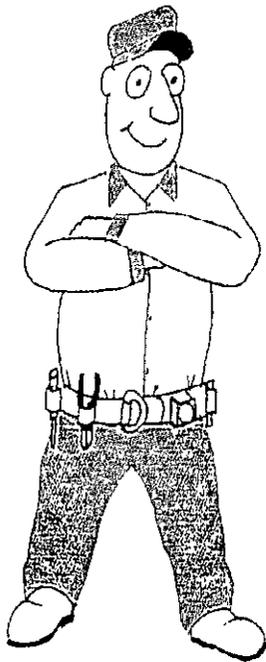


Fig. 7.1: Un buen programa de mantenimiento es muy importante para el funcionamiento correcto de un equipo de medición.

1. Se debe eliminar el exceso de plantas acuáticas en el canal de llagada que pudieran provocar flujos no deseados.
2. Se deben eliminar las algas que crecen en la estructura, esto se debe de hacer de manera sistemática y periódicamente con un cepillo o escobón, o en su defecto pintar la estructura con algún producto alguicida marino, para evitar que estas reduzcan el área mojada en la sección de control.
3. Si se depositan grandes cantidades de sedimento, será necesario eliminar periódicamente este tipo de material.

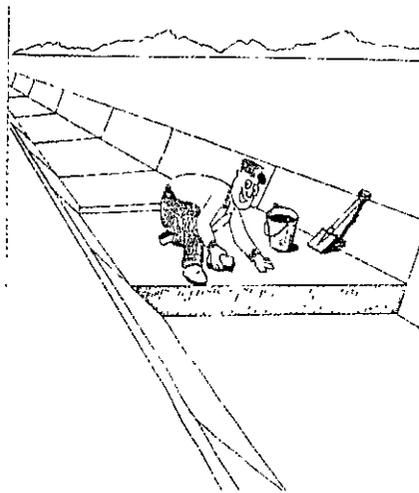


Fig. 7.2: Mantener la sección de control limpia de algas, permitirá obtener datos más precisos.

Por otro lado, es necesario dar mantenimiento a los dispositivos de la estación o sección de aforo:

1. Para el caso en que la regla o escala se encuentre directamente colocada sobre las paredes del canal se

recomienda remarcar o pintar periódicamente las graduaciones para evitar que estas se borren debido a los agentes del medio ambiente.

2. Cuando se cuenta con un limnómetro para medir la carga, se deben mantener lubricadas todas las partes móviles para su buen funcionamiento.

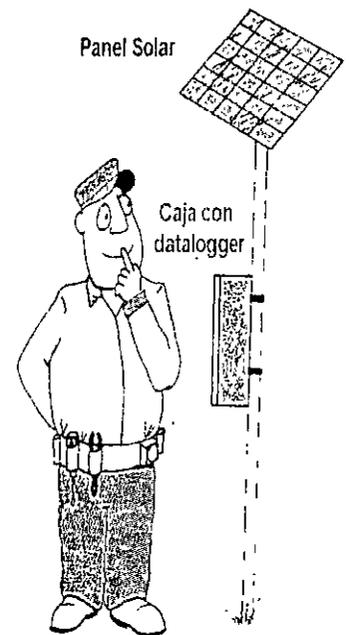


Fig. 7.3: Dar mantenimiento al equipo de adquisición de datos es muy importante para tener registros continuos de información.

En el caso específico cuando la estación de aforo cuenta con registradores automáticos:

1. Se deben realizar inspecciones periódicas a todos los componentes del sistema de adquisición de datos.

2. Revisar periódicamente que el sensor se encuentre funcionando correctamente, para lo cual en algunas ocasiones será necesario comparar el caudal registrado con algún otro equipo de medición, esporádicamente será necesario desmontarlo y llevarlo al laboratorio para su calibración.
3. Se deberá revisar periódicamente que el sistema de almacenamiento de datos cuente con espacio suficiente para almacenar la información necesaria, por lo cual se recomienda bajar los datos almacenados periódicamente para liberar espacio en la memoria y así evitar la pérdida de información importante.
4. En el caso de que la fuente de alimentación de energía sea una batería, se debe verificar que ésta cuente con el voltaje requerido para el buen funcionamiento del sistema de adquisición y almacenamiento de la información
5. Cuando se tiene un panel solar es necesario limpiarlo periódicamente para evitar la acumulación de polvo u otras sustancias sobre el mismo.
6. Finalmente, se deben realizar inspecciones periódicas en todas las conexiones tanto eléctricas como hidráulicas para obtener un buen funcionamiento de todo el sistema.

8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

8.1 VENTAJAS

Los aforadores de garganta larga son dispositivos de medición, los cuales tienen muchas aplicaciones. Entre sus ventajas se incluyen:

1. La garganta del aforador puede ser de cualquier geometría en la dirección perpendicular al flujo, que permite la medición precisa del caudal dentro de un rango muy amplio de variación.
2. Los aforadores de garganta larga se consideran como estructuras confiables y precisas si se realiza un buen diseño.
3. Requiere una pérdida de carga mínima a través del aforador.
4. Con una adecuada transición de llegada, puede pasar cualquier objeto flotante.
5. Puede diseñarse para que pase sedimento en canales con flujo subcrítico.
6. Para canales pequeños y medianos son relativamente económicos.
7. El registro de lecturas puede almacenarse automáticamente.
8. Pueden ser prefabricados e instalarse fácilmente en canales ya existentes con su propia tabla de calibración.

8.2 DESVENTAJAS

1. Este tipo de estructuras son más costosas que los vertedores de pared delgada.
 2. No se pueden usar donde existan estructuras o curvas muy cercanas aguas arriba.
 3. Deben construirse con mucho cuidado y una gran precisión.
 4. Tienen un costo relativamente alto cuando se construyen en canales muy grandes.
9. Se tienen pocos problemas con materiales flotantes, debido a que las transiciones de entrada y salida son graduales.
 10. Pueden calibrarse analíticamente.
 11. Existen diversos programas de computadora para el diseño de aforadores de garganta larga.

AUTOEVALUACIÓN No. 2



- ¿Cómo se define la pérdida de carga entre la sección de aforo y la sección de control?
 - $H_1 - H_2$
 - $H_1(1 - C_d^{1/n})$
 - $H_1(1 - C_d^{1/n})$
 - $H_c - H_2$
- Según Manning como se evalúa la pérdida de carga.
 - $\Delta H = \frac{L v^2}{C^2 R} = \frac{L v^2}{R C^2}$
 - $\Delta H = \frac{n L v^2}{C_u^2 R^{4/3}} = \frac{L v^2 n^2}{R R^{1/3}}$
 - $\Delta H = \frac{C_f L v^2}{2gR} = \frac{C_f L v^2}{2g R}$
 - $\Delta H = \frac{n L v^2}{C_u^2 R^{5/4}} = \frac{L v^2 n^2}{R R^{1/4}}$
- ¿Cómo se define el límite modular?
 - H_1/L
 - h_1/H_1
 - H_1/H_2
 - H_2/H_1
- ¿Cuál es el valor recomendado para el límite modular?
 - 1.2
 - 1.5
 - 3
 - menor que 1
- ¿Cuál es el rango de valores recomendado para la longitud de la garganta (H_1/L)?
 - 2 a 4
 - 5 a 10
 - 0.1 a 1
 - 0.5 3
- ¿Cuál es el porcentaje de error en una aforador de garganta larga si H_1/L se encuentra entre 0.2 y 0.7?
 - 10%
 - 2%
 - 1%
 - 0.2%
- ¿Cuál de las siguientes relaciones no se recomienda en la transición de salida?
 - 6:1
 - 2:1
 - 4:1
 - 10:1
- ¿Cuál es el rango de las relaciones recomendadas para la rampa de entrada?
 - 2:1 a 3:1
 - 1.5:1 a 4:1
 - 3.5:1 a 4.2:1
 - 5:1 a 10:1
- ¿Cuál sería el factor de conversión entre una escala colocada verticalmente y otra escala colocada en un talud de 1.5:1?
 - 2.01
 - 0.8086
 - 1.640
 - 1.803
- ¿Por qué debe evitarse la formación de algas en la cresta del aforador?
 - Rompen la estructura
 - Provocan mal olor
 - Reducen el área hidráulica
 - Provocan mal aspecto
- ¿Cuál es una de las desventajas de los aforadores de garganta larga?
 - Su economía
 - No tienen problemas con materiales flotantes
 - Su construcción requiere de una gran precisión.
 - Son confiables y precisos

CAPITULO 2 FLUJO UNIFORME

2.1 Introducción

El flujo uniforme raramente ocurre en la naturaleza debido a que los canales naturales son usualmente no prismáticos. Aún en canales prismáticos, la ocurrencia de flujo uniforme es relativamente poco frecuente debido a la existencia de controles tales como vertedores, compuertas deslizantes, etc., los cuales dictan una relación tirante-gasto diferente de la apropiada a un flujo uniforme.

Sin embargo, el flujo uniforme es una condición de importancia básica que debe ser considerado en todos los problemas de diseño de canales. Por ejemplo, si se propone instalar ciertos controles en un canal de riego, es necesario comparar su relación gasto-tirante con la de flujo uniforme y el carácter conjunto del flujo en el canal dependerá de la forma que resulte de dicha comparación. En un canal con cierta pendiente

$$z_c = \frac{f}{g} V^2 F \left(Re, \frac{\epsilon}{R_h} \right)$$

donde ϵ es la rugosidad absoluta de la pared. (Apéndice B del Vol 1)

Por tanto, se obtiene:

$$f R_h S = \frac{f}{g} V^2 F \left(Re, \frac{\epsilon}{R_h} \right) \quad (2.2)$$

o sea

$$V = \sqrt{\frac{g}{F}} \sqrt{R_h S} \quad (2.3.a)$$

$$V = C \sqrt{R_h S} \quad (2.3.b)$$

que es la fórmula de Chezy, idéntica a la encontrada para tubos. C es un coeficiente de fricción que es función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa del canal.

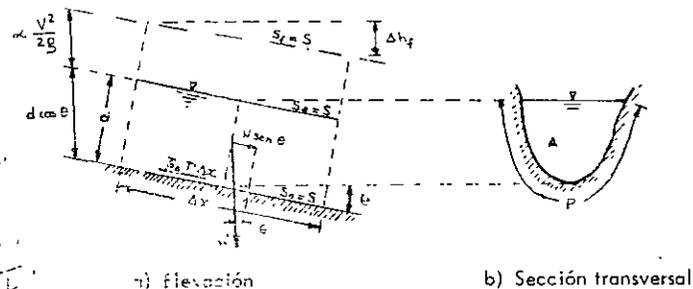


Fig 2.1. Equilibrio de un prisma líquido en flujo uniforme.

La ec (2.3.b) también se escribe como sigue:

$$S = \frac{8g}{C^2} \frac{1}{4 R_h} \frac{V^2}{2g} = \frac{f}{4 R_h} \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

donde

$$f = \frac{8g}{C^2} \quad (2.5)$$

La ec (2.4) es la fórmula de Darcy-Weisbach aplicable a canales y es idéntica a la de tubos con la única salvedad de que se ha escrito en términos del radio-hidráulico y no del diámetro, como es común hacerlo.

Estos resultados parecen indicar una completa analogía en el problema de fricción entre canales y tubos, siendo suficiente que en las fórmulas obtenidas para los últimos se utilice a $4 R_h$ en lugar del diámetro. El radio hidráulico tomaría en cuenta el efecto de forma en la sección del canal. Sin embargo, para llegar a estas conclusiones se ha tenido que aceptar la existencia de un esfuerzo tangencial medio sobre toda la pared, el cual es dependiente de R_h como única magnitud que toma en cuenta la forma de la sección (ec 2.1.a). Las últimas investigaciones sobre el tema parecen encaminarse a corregir los errores involucrados en esta consideración.

2.3 Flujo laminar a superficie libre

$Re < 500$

En un conducto abierto, el flujo laminar se presenta para números de Reynolds inferiores a 500. A través de las ecuaciones del movimiento derivadas en el Capítulo 4 del Vol 1, se puede obtener la ley de distribución de velocidades para este tipo de flujo, el cual se considera además permanente e incompresible.

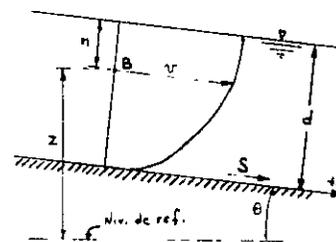


Fig 2.2. Distribución de velocidades en un flujo laminar.

Con referencia a la fig 2.2, se considera este tipo de flujo en un canal muy ancho que lo aproxima al flujo bidimensional.

De acuerdo con la ec (1.12b), la presión en un punto B sobre la sección transversal es

$$\frac{p}{\gamma} = n \cos \theta$$

y debido a que el flujo es uniforme, dicha presión no cambia de una sección a otra; esto es: $\partial p / \partial x = 0$; por la misma razón $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$. Además, con $\partial z / \partial x = S$, al aplicar la ec (4.9a) del Vol 1, resulta que:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial n} - g \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial t}$$

y con $\tau = -\mu \frac{\partial v}{\partial n}$ y $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$, se tiene: $-\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} - gS = 0$

o bien, integrando resulta que:

$$\frac{\partial v}{\partial n} = -\frac{\rho g}{\mu} S n + C_1$$

La constante de integración C_1 se obtiene de la condición de frontera -- que para $n = 0$, $\frac{\partial v}{\partial n} = 0$; esto es, la velocidad es máxima sobre la superficie libre. -- Por tanto, $C_1 = 0$. Integrando nuevamente, se obtiene:

$$v = -\frac{\delta}{2\mu} S n^2 + C_2$$

Para $n = d$, $v = 0$, y entonces

$$C_2 = \frac{\delta}{2\mu} S d^2$$

La solución final resulta:

$$v = \frac{\delta}{2\mu} S (d^2 - n^2) \quad (2.6)$$

La ec (2.6) representa una ley parabólica de distribución de velocidades -- muy semejante a la de los conductos forzados. En esta ecuación S corresponde a la pendiente por fricción que, en el caso de flujo uniforme, es igual a la del fondo. Para $n = 0$, se obtiene la velocidad máxima: $v_{\text{máx}} = \delta S d^2 / 2\mu$.

La velocidad media resulta:

$$V = \frac{1}{A} \iint_A v \, dA = \frac{1}{d} \int_0^d \frac{\delta}{2\mu} S (d^2 - n^2) \, dn$$

Al efectuar la integración y tomar límites, se tiene:

$$V = \frac{\delta S d^2}{3\mu} = \frac{2}{3} v_{\text{máx}} \quad (2.7)$$

Un cálculo sencillo muestra que la velocidad media se localiza a 0.42d desde la plantilla.

Esto es, nuevamente en el flujo laminar en canales, la pérdida de energía es proporcional a la primera potencia de la velocidad. Si se despeja S de la ec(2.7) y se sustituye en la ec (2.4), resulta:

$$\frac{3\mu}{\rho d^2} V = \frac{f}{4 R_h} \frac{V^2}{2g}$$

Despejando a f y tomando en consideración la ec (2.5), se tiene que:

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{24}{Re} \quad (2.8)$$

donde

$$Re = \frac{V R_h}{\nu}$$

Igual que en un tubo, el flujo laminar en un canal rectangular muy ancho depende exclusivamente del número de Reynolds. Se han hecho desarrollos semejantes para otras formas de sección concluyendo que el coeficiente f queda expresado por una ecuación general semejante a (2.8)

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{K}{Re} \quad (2.9)$$

donde K depende de la forma de la sección.

La ec (2.8) ha sido verificada experimentalmente en canales lisos y en la ref 2 se presentan los resultados obtenidos en la Universidad de Minnesota para canales muy anchos. En canales triangulares con ángulos centrales variando entre 30° y 150° se ha encontrado una buena concordancia para $K = 14$ en la ec (2.9). Sin embargo, en el caso de canales rugosos, se ha encontrado que K es generalmente más grande que en canales lisos, variando dentro del rango 33 y 60 (ref 2).

2.4 Flujo turbulento a superficie libre

Con base en la ley universal de distribución de velocidades (Apéndice B del Vol 1) Keulegan (ref 3) derivó ecuaciones teóricas para determinar la velocidad --

media en canales lisos y rugosos de gran ancho con flujo turbulento uniforme. Dichas --

ecuaciones son:

$$\text{Canales lisos } V = v_* (A_l + 5.75 \log \frac{v_* R_h}{\nu})$$

$$\text{Canales rugosos } V = v_* (A_r + 5.75 \log \frac{v_* R_h}{\nu})$$

$$v_* = \sqrt{\frac{8g}{C}} = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

donde

v_* velocidad de fricción (ec 2.1. b)

A_l, A_r cantidades variables de acuerdo con la rugosidad

Con resultados de ensayos de Bazin y del propio Keulegan, éste obtuvo

los siguientes valores:

canales lisos	$A_l = 3.25$
canales de rugosidad ondulada	$A_r = 1.3$
canales de madera	$A_r = -3$
canales rugosos	$A_r = 3.23 \text{ a } 16.92$ (medio 6.25)

Con base en resultados de distintos autores, Iwagaki hizo un estudio más profundo y encontró que la resistencia al flujo turbulento en un canal es mayor que en un tubo (de igual rugosidad y radio hidráulico) a medida que aumenta el número de Froude ($\bar{F}_r = V / \sqrt{gY}$) en el primero, lo cual se atribuye a la inestabilidad de la superficie libre del canal que crece con dicho número. En la ref 2 se presentan los valores de C_l y C_r contra los de F_r obtenidos por dicho autor.

Hasta ahora no se ha realizado una investigación experimental exhaustiva del factor de fricción C , tal como la efectuada para f en el caso de tubos, no sólo debido a las variables adicionales en el caso de los canales, sino también al rango tan amplio de magnitudes y tipos de rugosidad encontradas en la práctica y también a la dificultad de obtener en el laboratorio un flujo uniforme permanente completamente desarrollado.

Hasta la fecha de publicación del libro de Chow (1959), se había verifi-

cado parcialmente que el factor de fricción C ó f en canales se podría obtener de las fórmulas para conductos forzados, modificando simplemente el número de Reynolds para referirlo al radio hidráulico ($D = 4 R_h$). Schmidt y Chow (refs 1 y 2) presentan en sus libros los resultados de diferentes investigadores para confirmar lo anterior, siendo sus conclusiones más importantes las siguientes:

a) Zona laminar. En canales lisos, el factor f sigue las ecuaciones generales (2.8) y (2.9). Se verifica la ec (2.8) para sección rectangular muy ancha y que $K = 14$ en la sección triangular. En canales rugosos el factor f sigue la ley dada por la ec (2.9) pero K adquiere valores mayores que los obtenidos para canales lisos, variando entre 33 y 60 de acuerdo con la forma de la sección y la rugosidad.

b) Zona de transición. Como en los tubos, el estado de flujo cambia de laminar a turbulento a medida que aumenta el número de Reynolds, con una zona de transición cuyos límites no están bien definidos. El límite inferior depende de la forma de la sección y varía entre 500 y 600. El superior puede llegar hasta 2500.

c) En la zona turbulenta los resultados experimentales siguen aproximadamente la ecuación de Blasius (ec 8.11 del Vol 1) que, con $D = 4 R_h$ en el número de Reynolds, es:

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{0.223}{R_e^{1/4}} \tag{2.10}$$

la cual vale para $R_e < 2.5 \times 10^4$ y también la de Prandtl-von Kármán que con las mismas transformaciones es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log (R_e \sqrt{f}) + 0.4 \tag{2.11}$$

válida hasta $R_e = 2.5 \times 10^4$. Después se observa un ascenso más o menos brusco a medida que aumenta el número de Reynolds para después tender a la horizontal en el estado de turbulencia plenamente desarrollada. En canales lisos la forma de la sección no tiene una influencia importante sobre f . Lo contrario acontece en canales rugosos, debido posiblemente a la formación de corrientes secundarias, cuya intensidad cambia con la forma de la sec

ción y para los cuales f es independiente de Re y sólo dependiente de la forma de la sección.

Investigaciones realizadas posteriormente permitieron observar que por el efecto de la superficie libre y la interdependencia entre el radio hidráulico, gasto y pendiente, la relación $f - Re$ en un canal no sigue exactamente los resultados obtenidos para los tubos (ref 5).

A partir de la ley de distribución universal de velocidad de von Kármán, Keulegan había derivado ya una ecuación diferente de la (2.11) para canales rectangulares muy anchos que es

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2.03 \log (Re \sqrt{f}) + 0.14 \quad (2.12)$$

Por lo que respecta a la zona de transición, en la ref 6 se sugiere la aplicación de la fórmula de Colebrook y White válida para tubos, con coeficientes ligeramente modificados:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left(\frac{12 R_h}{\epsilon} + \frac{Re \sqrt{f}}{0.6375} \right) \quad (2.13)$$

usando para la rugosidad absoluta ϵ los valores dados en la tabla 2.1. En el caso de canales rugosos y plena turbulencia, esta ecuación se simplifica a la obtenida por Nikuradse para tubos, aplicado ahora a canales:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left(\frac{12 R_h}{\epsilon} \right) \quad (2.14)$$

Tabla 2.1. Valores de ϵ en mm para superficies de mampostería y concreto

Concreto en construcción monolítica, colado sobre moldes metálicos impregnados de aceite, sin irregularidades superficiales	0,15
Superficies de cemento muy liso con juntas terminadas a mano	0,3
Concreto colado en moldes metálicos aceitados, con juntas cuidadosamente terminadas	0,48
Acueductos y tubos de madera o de concreto colado en formas de acero o precolados. Superficies alisadas. Tubos de barro vitrificado	0,6

Concreto en construcción monolítica colado en formas rugosas o superficies terminadas con gunita	1,5
Longitudes cortas de tubos de concreto de pequeño diámetro sin acabado especial en las juntas	2,4
Concreto en tubos precolados con mortero en las juntas. Canales rectos en tierra	3,0
Conductos de concreto rugoso	4,2
Mampostería mal acabada	6,0
Gunita no tratada	0,3

Con ensayos en canales rectangulares de relaciones de aspecto y/b (tirante/ancho de plantilla) variando entre 0,025 y 0,144, Tracy y Lester (ref 7), en 1961, concluyeron una pequeña modificación a la constante aditiva de la ec (2.12) proponiendo el valor $-0,08$.

E. O. Macagno (ref 8), en 1965, demostró que si se usa la ley logarítmica de Prandtl como una aproximación a la distribución de velocidades en canales de formas diferentes, es necesario cambiar tanto la constante aditiva como la multiplicativa.

Shih y Grigg (ref 9) en 1967 realizaron experimentos en canales de características similares a los de Tracy y Lester y concluyeron que los efectos de forma no quedan plenamente reflejados por el radio hidráulico, especialmente para relaciones de aspecto (y/b) muy grandes. Simultáneamente, Unger (ref 10) llegó a conclusiones semejantes y observó la necesidad de utilizar coeficientes de forma de la sección del canal que influyera en la magnitud de la rugosidad.

Con base en los resultados de Tracy y Lester y de Shih y Grigg, N. Narayana (ref 11) concluyó que el radio hidráulico de la sección es muy útil, pero que para reflejar el efecto de forma es necesario otro parámetro lineal que es P/R_h (perímetro mojado/radio hidráulico). Para canales rectangulares lisos dicho autor presenta una modificación a la ec (2.11) que es:

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = \frac{C'}{\sqrt{2g}} = 2 \log Re \sqrt{f'} + 0.4 \quad (2.15)$$

donde f' es un factor de fricción modificado que Narayana hace depender de P/R_h ; sin embargo, obsérvese que en el caso de canales rectangulares es equivalente a que dependa de la relación tirante/ancho. En la fig 2.3 se presenta la variación de f/f' con y/b , determinada por el autor de este libro a partir de los resultados de Narayana. En esta figura, f es el factor de fricción de la ec (2.11) y f' de la ec (2.15) Narayana sugiere determinar dependencias similares para otras formas de sección.

Finalmente ha sido E. Blau en 1969 (ref 12) quien parece haber dado la explicación más convincente al uso de factores de fricción modificados dependientes de la relación de aspecto. En efecto, para la derivación de la fórmula de Chezy (ec 2.3b), se

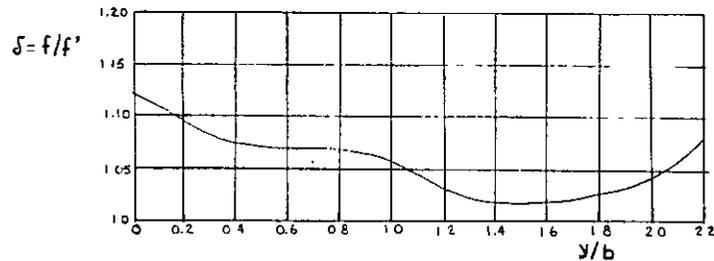


Fig 2.3 Variación de f/f' con la relación de aspecto para canales rectangulares lisos.

acepta la existencia de un esfuerzo tangencial medio τ_0 sobre la frontera que no depende de la forma de la sección del canal y que coincide con el procedimiento de derivación seguido en los tubos. Esto no parece correcto en el caso de canales por la distribución tan irregular que pueda tener τ sobre la pared de las muchas formas de sección, y que para seguir utilizando la fórmula de Chezy, sería necesario hacer una corrección a dicha consideración haciendo que el esfuerzo tangencial medio verdadero sea:

$$\tau_0' = \delta \tau_0 \quad (2.16)$$

donde

- δ factor de corrección que depende de la forma y relación de aspecto de la sección del canal
- τ_0 esfuerzo tangencial medio usado en la derivación de la fórmula de Chezy y expresado por la ec (2.1a).

Esto implica una corrección en la fórmula de Chezy y que al seguir nuevamente su desarrollo sería

$$V = C \sqrt{\delta R_h S} = C' \sqrt{R_h S} \quad (2.17)$$

donde

$$C' = C \sqrt{\delta}$$

o bien, de esta ecuación y de la (2.5) resulta:

$$\delta = \left(\frac{C'}{C}\right)^2 = \frac{f}{f'} \quad (2.18)$$

que es la misma relación obtenida por Narayana y presentada en la fig 2.3.

En la ref 12, Blau presenta los resultados obtenidos por Zschiesche en 1952 sobre mediciones realizadas en ríos y modelos de diferentes rugosidades y formas de sección. Las figs 2.4 a y b presentan dichos resultados (con algunas modificaciones hechas por el autor) a través de la dependencia entre el factor de fricción C de Chezy y el número de Reynolds, haciendo una comparación con las fórmulas empíricas de diferentes autores.

De acuerdo con las investigaciones de distribución de esfuerzo cortante, Blau pudo obtener el valor de δ para canales rectangulares en función de y/b que permite corregir los valores de Zschiesche. Sus resultados se presentan en las figs 2.5 a, b, y c para canales rectangulares de un metro de ancho de plantilla y diferentes rugosidades. De la fig 2.5a se observan discrepancias hasta de 12 por ciento respecto de los resultados presentados por Narayana (fig 2.3).

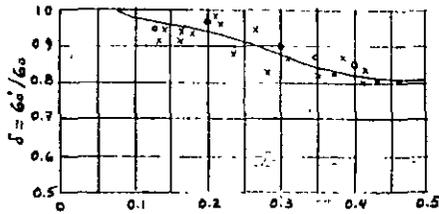


Fig 2.5a $\delta = f(y/b)$ para canales rectangulares de cemento liso, $b = 1$ m

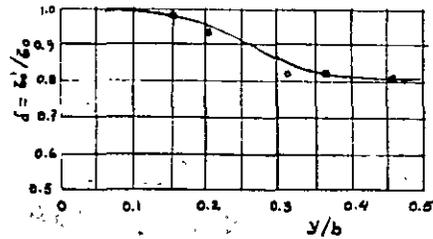


Fig 2.5b $\delta = f(y/b)$ para canales rectangulares de concreto, $b = 1$ m, rugosidad $\epsilon = 4$ mm

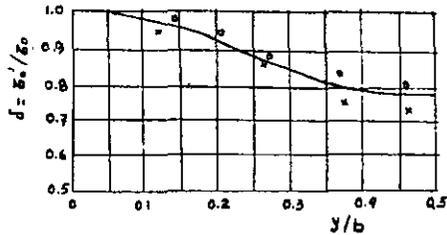


Fig 2.5c $\delta = f(y/b)$ para canales rectangulares de concreto, $b = 1$ m, rugosidad $\epsilon = 28$ mm

Para aclaración en el uso de estos resultados se presenta a continuación-

un problema.

Problema 2.1 Determinar el gasto que transporta en flujo uniforme un canal rectangular de concreto de 6 m de ancho, tirante de 3 m, pendiente de plantilla $S = 0.001$, con agua a la temperatura de 13°C .

Solución Se tiene que la relación $y/b = 3/6 = 0.5$ y de la fig 2.5a, $\delta = 0.81$.

Además, $R_h = (6 \times 3) / (6 + 2 \times 3) = 1.5$ m y de la ec (2.17) resulta que:

$$V = C \sqrt{0.81 \times 1.5 \times 0.001} = 0.0348 C$$

Debido a que la solución es por tanteos, de la fig 2.4 se estima $C = 80$ y

por lo tanto, $V = 2.78$ m/seg. Para agua a 13°C , $\nu = 1.20 \times 10^{-6}$ m²/seg. El número de Reynolds es:

$$Re = \frac{V R_h}{\nu} = \frac{2.78 \times 1.5 \times 10^6}{1.2} = 3.47 \times 10^6$$

por lo tanto, de la fig 2.4 b, para canal de concreto liso resulta $C = 79$ dentro de la zona de flujo turbulento, existiendo entonces un valor más correcto para V que es

$$V = 0.0348 \times 79 = 2.75 \text{ m/seg}$$

y el número de Reynolds vale ahora $Re = 3.44 \times 10^6$, que nuevamente conduce a $C = 79$, quedando así hecho el ajuste. El gasto vale entonces:

$$Q = VA = 2.75 \times 3 \times 6 = 49.5 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Con fines comparativas se hará a continuación el cálculo del gasto utilizando la ec (2.13). Para ello se elige $\epsilon = 1.5$ mm de la tabla 2.1. Así mismo, en forma tentativa con $Re = 3.44 \times 10^6$, y con

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{8 \times 9.8}{(79)^2} = 0.01255$$

de la ec (2.13) se obtiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{12 \times 1.5}{0.0015} + \frac{3.44 \times 10^6 \sqrt{0.01255}}{0.6375} \right) = 11.58$$

resultando entonces que f y C valen:

$$f = 0.00745$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \sqrt{\frac{8 \times 9.8}{0.00745}} = 102.5$$

Con nuevo ajuste resulta

$$V = 102.5 \sqrt{1.5 \times 0.001} = 3.97 \text{ m/seg}$$

$$Re = \frac{3.97 \times 1.5 \times 10^6}{1.2} = 4.96 \times 10^6$$

$$\frac{l}{f} = 2 \log \left(\frac{12 \times 1.5}{0.0015} + \frac{4.96 \times 10^6 \sqrt{0.00745}}{0.6375} \right) = 11.67$$

Resultando entonces que:

$$f = 0.0073, C = 103.5$$

$$V = 103.5 \sqrt{1.5 \times 0.001} = 4.01 \text{ m/seg}$$

$$Q = 4.01 \times 18 = 72.7 \text{ m}^3/\text{seg}$$

que es 45 por ciento mayor que el obtenido con los resultados de Blau.

En el caso de canales trapeciales, Blau encontró buena concordancia con los resultados de la fig 2.4 sin necesidad del factor correctivo δ , debido a que para esta forma de sección, el esfuerzo cortante se distribuye más uniformemente sobre el perímetro mojado (inciso 2.10.3).

2.5 Fórmulas usuales para canales con flujo turbulento

La mayor parte de los problemas que se presentan en la práctica son con flujo turbulento y por esta razón se han desarrollado varias fórmulas para calcular las pérdidas por fricción en canales con ese flujo.

Todos los esfuerzos han sido encaminados a valuar el coeficiente C de Chezy en la ec 2.3b, de acuerdo con distintas fórmulas. Las más conocidas se presentan en la tabla 2.2.

2.6 La fórmula de Manning - Strickler

De las fórmulas presentadas en la tabla 2.2, la de Manning-Strickler es quizá la más conocida en la mayoría de los países occidentales y por esta razón merece aquí una serie de aclaraciones adicionales.

Su origen es completamente distinto de la ec (2.14) y es deseable hacer una comparación entre ellas para encontrar si existe diferencia en los resultados proporcionados por ambas. Su presentación gráfica se muestra en la fig 2.6 (ref 13) sobre papel logarítmico, la cual se puede aproximar a una recta de pendiente 1:3 con una ecuación del tipo:

$$f = k_1 \left(\frac{\epsilon}{R_h} \right)^{1/3} \quad (2.19)$$

Tabla 2.2. Fórmulas usuales para el cálculo del factor de fricción C de Chezy. En estas fórmulas, R_h radio hidráulico en m, S pendiente hidráulica.

Autor	Fórmula	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + (23 + \frac{0.00155}{S}) \frac{n}{R_h}}$	Se aconseja para canales naturales para los cuales usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es completa y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n, donde n es un coeficiente que depende de la rugosidad del canal según tabla 2.3
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter y por tanto más sencilla. m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{B}{\sqrt{R_h}}}$	Estrá basada en una buena cantidad de experiencias y es relativamente sencilla. B es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Kozeny	$C = 20 \log Y + N_c$	es análogo a la de los tubos y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Mises y Bazin. Y es el tirante hidráulico en m y N_c un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Martínez	$C = 17.7 \log \frac{R_h}{d} + 13.6$	Fue obtenida de muchas mediciones en ríos de la Unión Soviética, d es el diámetro del grano del material en el fondo del río en m y vale para $0.15 \leq R_h \leq 2.25$ m, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d \leq 0.25$ m (ref 12)
Manning - Strickler	$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$	Fue obtenida a partir de siete fórmulas diferentes basadas en ensayos de Bazin y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.4.
Pavlovski	$C = \frac{R_h^m}{n}$	Considera que el exponente en la fórmula de Manning no es una constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad como sigue $m = 1.5 - n$ para $R_h < 1$ m y $m = 1.3 - 0.5 \sqrt{n}$ para $R_h > 1$ m.

$$\frac{1}{f} = 2 \log \left(\frac{12 \times 1.5}{0.0015} + \frac{4.96 \times 10^6 \sqrt{0.00745}}{0.6375} \right) = 11.67$$

Resultando entonces que:

$$f = 0.0073, C = 103.5$$

$$V = 103.5 \sqrt{1.5 \times 0.001} = 4.01 \text{ m/seg}$$

$$Q = 4.01 \times 18 = 72.7 \text{ m}^3/\text{seg}$$

que es 45 por ciento mayor que el obtenido con los resultados de Blau.

En el caso de canales trapezoidales, Blau encontró buena concordancia con

los resultados de la fig 2.4 sin necesidad del factor correctivo δ , debido a que para esta forma de sección, el esfuerzo cortante se distribuye más uniformemente sobre el perímetro mojado (inciso 2.10.3).

2.5 Fórmulas usuales para canales con flujo turbulento

La mayor parte de los problemas que se presentan en la práctica son con flujo turbulento y por esta razón se han desarrollado varias fórmulas para calcular las pérdidas por fricción en canales con ese flujo.

Todos los esfuerzos han sido encaminados a valuar el coeficiente C de Chezy en la ec 2.3b, de acuerdo con distintas fórmulas. Las más conocidas se presentan en la tabla 2.2.

2.6 La fórmula de Manning-Strickler

De las fórmulas presentadas en la tabla 2.2, la de Manning-Strickler es quizá la más conocida en la mayoría de los países occidentales y por esta razón merece aquí una serie de aclaraciones adicionales.

Su origen es completamente distinto de la ec (2.14) y es deseable hacer una comparación entre ellas para encontrar si existe diferencia en los resultados proporcionados por ambas. Su presentación gráfica se muestra en la fig 2.6 (ref 13) sobre papel logarítmico, la cual se puede aproximar a una recta de pendiente 1:3 con una ecuación del tipo:

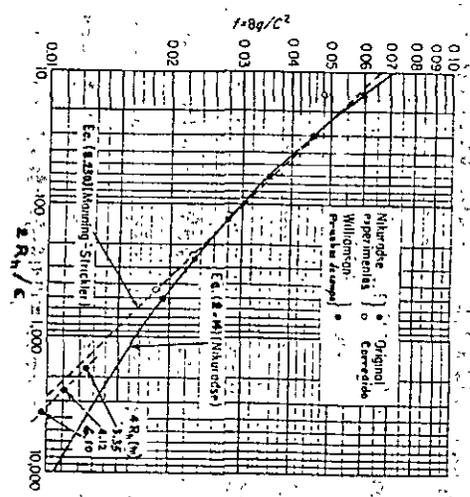
$$f = k_1 \left(\frac{\epsilon}{R_h} \right)^{1/3} \quad (2.19)$$

Tabla 2.2. Fórmulas usuales para el cálculo del factor de fricción C de Chezy. En estas fórmulas, R_h radio hidráulico en m, S pendiente hidráulica.

Autor	Fórmula	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + (23 + \frac{0.00155}{S}) \frac{n}{R_h}}$	Se aconseja para canales naturales para los cuales usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es completa y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n, donde n es un coeficiente que depende de la rugosidad del canal según tabla 2.3
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter y por tanto más sencilla. m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{B}{\sqrt{R_h}}}$	Está basada en una buena cantidad de experiencias y es relativamente sencilla. B es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Kozeny	$C = 20 \log Y + N_c$	as análoga a la de los tubos y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Mises y Bazin. Y es el tirante hidráulico en m y N_c un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Martínez	$C = 17.7 \log \frac{R_h}{d} + 13.6$	Fue obtenida de muchas mediciones en ríos de la Unión Soviética. d es el diámetro del grano del material en el fondo del río en m y vale para $0.15 \leq R_h \leq 2.25$ m, $0.0004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d \leq 0.25$ m. (ref. 12)
Manning-Strickler	$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$	Fue obtenida a partir de siete fórmulas diferentes basadas en ensayos de Bazin y posteriormente verificadas por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.4.
Pavlovski	$C = \frac{R_h^E}{n}$	Considera que el exponente en la fórmula de Manning no es una constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad como sigue $Z = 1.5$ n para $R_h < 1$ m y $Z = 1.3 \sqrt{n}$ para $R_h > 1$ m.

I Secciones cerradas parcialmente llenas	Ganguillet y Kutter	Kutter	Bazin	Kozyen
	n	m	B	N _c
Fierro fundido nuevo	0.012	0.20	0.06	
Fierro fundido usado		0.25	0.12	
Fierro colado	0.012	0.20		
Barro vitrificado nuevo		0.25		
Barro vitrificado usado	0.017	0.30 - 0.35		
Tubos de alcantarillado	0.017 - 0.020	0.30 - 0.35		
Túneles de concreto pulido	0.011 - 0.013	0.20 - 0.25	0.22	
II Secciones abiertas				
Madera cepillada	0.010	0.15 - 0.20	0.06	
Madera de acabado rugoso		0.30 - 0.35		
Mampostería de ladrillo bien acabada	0.013	0.25	0.16	70 - 76
Cemento pulido		0.20 - 0.25	0.10 - 0.16	84 - 90
Concreto pulido	0.012	0.20	0.11 - 0.22	
Concreto rugoso	0.017	0.65	0.45	58 - 62
Piedra brasa bien acabada	0.017	0.65		60 - 70
En tierra arroyos y ríos	0.025	1.75	1.4 - 1.6	
En tierra con material grueso y plantas	0.035	2.0 - 2.5	1.75	
Con cantos rodados	0.04 - 0.05	3.5 - 5.0	hasta 3.5	
Con gran rugosidad de fondo y maleza tupida	hasta 0.09			
Roca comodada				36 - 50
Roca a valteo				28 - 36
Grava gruesa (10 a 15 cm)				32 - 38
Grava media (5 a 10 cm)				38 - 42
Grava fina (2 a 3 cm)				42 - 46
Cantos rodados (15 a 20 cm)				28 - 32

- 45 -



- 46 -

Fig. 2.6. Factor de fricción para el flujo turbulento en canales

o bien, de la ec (2.5)

$$C = k_2 \left(\frac{R_h}{\epsilon} \right)^{1/6} \quad (2.20)$$

donde, $k_2 = (8g/k_1)^{1/2}$, que confirma la ecuación de Manning y permite concluir que

$$n = k_2 \epsilon^{1/6} \quad (2.21)$$

En efecto, Strickler en 1923, había ya obtenido la ecuación

$$n = 0.0131 \epsilon^{1/6} \quad (2.22)$$

Por otra parte, Williamson (ref 14) demostró experimentalmente que los resultados de Nikuradse se aproximan bastante a la ecuación

$$f = \frac{8g}{C^2} = 0.113 \left(\frac{\epsilon}{R_h} \right)^{1/3} \quad (2.23a)$$

o bien

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{0.038 \epsilon^{1/6}} \quad (2.23b)$$

esto es,

$$n = 0.01196 \epsilon^{1/6} \quad (2.24)$$

que es prácticamente la misma obtenida por Strickler (ec 2.22).

En ambas ecuaciones ϵ se mide en mm. Cuando se trata de ríos con cauce de grava, ϵ se puede sustituir por el tamaño medio del material d_{75} .

Si la fórmula de Manning se sustituye en la de Chezy (ec 2.3 b), resulta la expresión más conocida siguiente

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (2.25)$$

La ecuación de Manning no es aplicable a la zona de transición a menos que se acepte que n depende de Re . La frontera de transición está dada por el criterio

$$4 \leq \frac{v_* \epsilon}{\nu} \leq 100$$

Henderson concluye que existe una buena correspondencia entre la ec (2.14) y la fórmula de Manning y que esta última es adecuada para flujo permanente turbulento en canales rugosos; si bien existe un rango de tamaños intermedios en canales, para el cual la ec (2.14) es igualmente adecuada dentro de límites de seguridad normalmente aceptables.

La selección de un valor de n significa realmente estimar la resistencia al flujo en un canal dado. No es raro que el ingeniero piense que un canal tiene un único valor de n para cada rugosidad. En realidad, el valor de n es muy variable y depende de un gran número de factores. Su conocimiento básico es de gran utilidad para las diferentes condiciones de diseño. Los factores que ejercen mayor influencia sobre el coeficiente de rugosidad tanto en canales naturales como artificiales se detallan en la ref 2 y aquí se hace un breve resumen de los mismos.

a) Rugosidad superficial. Queda representada por el tamaño y forma de los granos del material sobre el perímetro mojado, y a menudo se considera el único factor en la se-

lección de n . Una misma sección puede contener diferentes rugosidades, generalmente con gravas gruesas en el fondo y finas en las orillas.

b) Vegetación. Se puede considerar como una rugosidad superficial que también reduce la capacidad del canal y retarda el flujo. Su acción depende del tipo, altura, densidad, distribución, etc.

c) Irregularidad del canal. Comprende las irregularidades en el perímetro mojado y las variaciones en sección transversal, tamaño y forma a lo largo del canal.

d) Alineación del canal. Las curvas con radios grandes proporcionan valores de n relativamente bajos, mientras que las agudas con varios meandros incrementan a n . Scobey sugiere que el valor de n se aumente en 0.001 por cada 20° de curvatura.

e) Sedimentación y erosión. Generalmente, la sedimentación puede cambiar de un canal muy irregular a uno relativamente uniforme y reducir n , mientras la erosión produce lo contrario, esto es, modifica la irregularidad del canal y la rugosidad superficial.

f) Obstrucciones. La presencia de pilas de puente, rejillas, etc., tienden a incrementar a n en una magnitud que depende de su tamaño, forma, número y distribución.

g) Tirante y gasto. En la mayoría de los ríos, n disminuye al aumentar el tirante y el gasto. Cuando el tirante disminuye, emergen las irregularidades del fondo del canal y tienen un efecto más pronunciado. Los cambios de tirante están íntimamente relacionados con el gasto.

En la tabla 2.4 se presenta una lista de valores de n para canales de varias clases y que ha sido propuesta por Chow. En ella se muestran valores mínimo, normal y máximo, de mucha utilidad como guía para una selección rápida de n . En la ref 2 Chow presenta una serie de fotografías de canales, útiles para una selección más cuidadosa del valor de n .

En ocasiones, la sección de un canal puede tener porciones del períme-

Tabla 2.4. Factor de fricción, n, (de Manning)

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. CONDUCTOS CERRADOS DESCARGANDO PARCIALMENTE LLENOS			
A.1 Metales			
a) Latón liso	0.009	0.010	0.013
b) Acero			
1. Soldado	0.010	0.012	0.014
2. Remachado	0.013	0.016	0.017
c) Hierro fundido			
1. Pintado	0.010	0.013	0.014
2. Normal	0.011	0.014	0.016
d) Hierro forjado			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e) Metal corrugado			
1. Drenaje	0.017	0.019	0.021
2. Drenaje pluvial	0.021	0.024	0.030
A.2 No metales			
a) Lucita	0.008	0.009	0.010
b) Vidrio	0.009	0.010	0.013
c) Cemento			
1. Liso	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
d) Concreto			
1. Alcantarillado recto y libre de escombros	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarillado con curvas, conexiones y algunos escombros	0.011	0.013	0.014
3. Acabado	0.011	0.012	0.014
4. Drenajes rectos con ventanas de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
5. No acabados, en cimbra de acero	0.012	0.013	0.014
6. No acabados, en cimbra de madera lisa	0.012	0.014	0.016
7. No acabados en cimbra de madera bruta	0.015	0.017	0.020
e) Madera			
1. Duela	0.010	0.012	0.014
2. Laminada y tratada	0.015	0.017	0.020
f) Arcilla			
1. Tubos de barro cocido común	0.011	0.013	0.017
2. Tubos de albañal vitrificado	0.011	0.014	0.017
3. Tubos de albañal vitrificado con ventanas de inspección	0.013	0.015	0.017
3. Mampostería juntada y aplanada con mortero de cemento	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería juntada con mortero de cemento	0.020	0.025	0.030
5. Mampostería seca volteo	0.020	0.030	0.035
g) Fondo de grava con lados de:			
1. Concreto cimbrado	0.017	0.020	0.025
2. Mampostería sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Mampostería seca a volteo	0.023	0.033	0.036
h) Ladrillo			
1. Vitricota	0.011	0.013	0.015
2. Con mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
i) Mampostería			
1. Juntada con mortero	0.017	0.025	0.030
2. Seca	0.023	0.032	0.035
j) Piedra labrada	0.013	0.015	0.017
k) Astalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
l) Cubierta vegetal	0.030		0.500
C. CANALES EXCAVADOS O DRAGADOS EN			
a) Tierra, recto y uniforme			
1. Limpio recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de intemperizado	0.018	0.022	0.025
3. Grava, sección uniforme y limpia	0.022	0.025	0.030
4. Con poco pasto y poca hierba	0.022	0.027	0.033
b) Tierra, con curvas y en régimen lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pasto y algo de hierba	0.025	0.030	0.033
3. Hierba densa o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Plantilla de tierra y mampostería en los lados	0.028	0.030	0.035
5. Plantilla roncosa y hierba en los bordos	0.025	0.035	0.040
6. Plantilla empedrada y bordos limpios	0.030	0.040	0.050
c) Excavado o dragado en línea recta			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Pocos arbustos en los bordos	0.035	0.050	0.060
4. Tubo vitrificado para drenes con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
g) Mampostería			
1. De vitricota	0.011	0.013	0.015
2. Acabados con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h) Drenajes sanitarios cubiertos de lama con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016
i) Drenaje con fondo liso	0.016	0.019	0.020
j) Acabados de cemento rugoso	0.018	0.025	0.030
B. CANALES RECUBIERTOS O EN RE-LLENO			
B.1 Metales			
a) Superficies de acero lisas			
1. No pintadas	0.011	0.012	0.014
2. Pintadas	0.012	0.013	0.017
b) Corrugadas	0.021	0.025	0.030
B.2 No metales			
a) Cemento			
1. Superficie lisa	0.010	0.011	0.013
2. En mortero	0.011	0.013	0.015
b) Madera			
1. Plana, no tratada	0.010	0.012	0.014
2. Plana, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Rústica	0.011	0.013	0.015
4. Tablones y tejamanil	0.012	0.015	0.018
5. Cubierta con tela	0.010	0.014	0.017
c) Concreto			
1. Acabado con llana metálica	0.011	0.013	0.015
2. Acabado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Acabado con grava en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin acabar	0.014	0.017	0.020
5. Gunitado, buena sección	0.016	0.019	0.023
6. Gunitado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca, excavado irregular	0.022	0.027	
d) Plantilla de concreto acabado con llana y taludes de			
1. Mampostería cuidada sobre mortero	0.015	0.017	0.020
2. Mampostería burda sobre mortero	0.017	0.020	0.024
d) Cortes en rocas			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Astillado e irregular	0.035	0.040	0.050
e) Canales abandonados, hierbas y arbustos sin limpiar			
1. Hierba densa tan alta como el tirante	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, arbustos en los taludes	0.040	0.050	0.080
3. Igual al anterior con máximo escurrimiento	0.045	0.070	0.110
4. Densos de arbustos, altos niveles de escurrimiento	0.080	0.100	0.140
D. CAUCES NATURALES			
D.1 Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas < 30 m)			
a) Corrientes en planicie			
1. Limpio, rectos, sin deslaves ni remansos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior pero más rocosos y con hierba	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, curvo, algunas irregularidades del fondo	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, algo de hierba y roca	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior pero menor profundidad y secciones poco eficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual que el 4 pero mas rocas	0.045	0.050	0.060
7. Tramos irregulares con hierba y estanques profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con mucha hierba, estanques profundos, o cauces de avenidas con raíces y plantas subacuáticas	0.075	0.100	0.150
b) Corrientes de montañas, sin vegetación en el cauce; taludes muy pendientes, árboles y arbustos a lo largo de las margenes que quedan sumergidas en las avenidas			
1. Fondo de grava, boleó y algunos cantos rodados	0.030	0.040	0.050
2. Fondo de boleó y grandes rocas	0.040	0.050	0.070

D.2. Planicies de avenida a) Pastura sin arbustos 1. Pasto bajo 2. Pasto alto b) Areas cultivadas 1. Sin cosecha 2. Cosecha en tierra labrada y pretera 3. Cosecha de campo c) Arbustos 1. Arbustos diseminados y mu- cha hierba 2. Pocos arbustos y árboles, en invierno 3. Pocos arbustos y árboles, en verano 4. Mirilina a densa población de arbustos, en invierno 5. Mirilina a densa población de arbustos, en verano d) Árboles 1. Población densa de sauces, en verano, rectos 2. Terrenos baldíos con troncos muertos 3. Igual al anterior pero con tron- cos rotos 4. Árboles de sombra y avenidas debajo de las ramas 5. Igual al anterior, pero las ave- nidas alcanzan a las ramas D.3 Ríos (cancho de la superficie libre del agua en avenidas >30 m) La n es menor que los arroyos de igual descripción por- que los bordes ofrecen menor resis- tencia. a) Secciones regulares sin cantos ro- dados ni arbustos b) Secciones rugosas e irregulares	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.060	0.070	0.100	0.150	0.200	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.100	0.150	0.200	0.025	0.035	0.060	0.100
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

tro mojado con rugosidades distintas, lo que implica diferentes valores de n para cada porción. En este caso se puede seguir aplicando la fórmula de Manning si se calcula un valor de n equivalente y representativo de todo el perímetro mojado de la sección. Para ello existen diferentes criterios. Se puede suponer que cada porción $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ del perímetro mojado, con coeficientes de rugosidad $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$, actúa sobre una porción del área hidráulica A_1, A_2, A_3, \dots . Horton y Einstein suponen que cada parte del área tiene la misma velocidad media de la sección completa, esto es, $V_1 = V_2 = \dots = V_n = V$ y que entonces el coeficiente de rugosidad equivalente se puede obtener de la ecuación:

$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} = \frac{(P_1 n_1^{1.5} + P_2 n_2^{1.5} + \dots + P_n n_n^{1.5})^{2/3}}{P^{2/3}} \quad (2.26)$$

Pavlovski, Mühlhofer y Banks suponen que la fuerza total resistente al flujo es igual a la suma de las mismas fuerzas desarrolladas sobre cada porción del perímetro y que:

$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i n_i)^2}{P^{1/2}} \right]^{1/2} = \frac{(P_1 n_1^2 + P_2 n_2^2 + \dots + P_n n_n^2)^{1/2}}{P^{1/2}} \quad (2.27)$$

Lotter supone que el gasto total del flujo es igual a la suma de los gastos de las porciones de área y que:

$$n = \frac{P R_h^{5/3}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i R_{hi}^{5/3}}{n_i} \right)} = \frac{P R_h^{5/3}}{\frac{P_1 R_{h1}^{5/3}}{n_1} + \frac{P_2 R_{h2}^{5/3}}{n_2} + \dots + \frac{P_n R_{hn}^{5/3}}{n_n}} \quad (2.28)$$

donde $R_{h1}, R_{h2}, \dots, R_{hn}$ son los radios hidráulicos de las porciones de área y para las secciones sencillas se puede aceptar que:

$$R_{h1} = R_{h2} = \dots = R_{hn} = R_h$$

Hasta ahora no existen resultados que indiquen mayor precisión de un

critério respecto al otro.

2.7 Cálculo del flujo uniforme

Como en las tuberías, en el cálculo de canales con flujo uniforme se pueden presentar problemas de revisión o de diseño. Los problemas de revisión consisten en calcular el gasto a través de una sección de geometría, rugosidad y pendiente conocidas. Los problemas de diseño consisten en calcular la geometría de la sección dada la pendiente y el gasto que circula, o bien, dada la geometría y el gasto, calcular la pendiente necesaria.

Cualquiera que sea el tipo de problema, son dos las ecuaciones que permiten el diseño del canal: la ecuación de continuidad

$$Q = A V \tag{2.29}$$

y la fórmula de Chezy para la fricción

$$V = C R_h^{1/2} S^{1/2} \tag{2.30}$$

El gasto se expresa entonces en la forma

$$Q = A V = C A R_h^{1/2} S^{1/2} = K S^{1/2} \tag{2.31}$$

donde el término

$$K = C A R_h^{1/2} \tag{2.32}$$

se conoce como "factor de conducción" de la sección del canal y es una medida de la capacidad de transporte al depender directamente del gasto.

Si se usa la fórmula de Manning, $C = R_h^{1/6} / n$, y

$$K = \frac{A R_h^{2/3}}{n} \tag{2.33.a}$$

La expresión

$$Z_n = A R_h^{2/3} = n K \tag{2.33.b}$$

se conoce como el módulo de sección para el cálculo de flujo uniforme y de la ec (2.34) -

también se expresa como sigue:

$$A R_h^{2/3} = \frac{n Q}{\sqrt{S}} \tag{2.34}$$

El segundo término de la ec (2.34) depende de n Q y S , pero el primero exclusivamente de la geometría de la sección. Esto demuestra que para una combinación particular de n Q y S hay un tirante único y_n llamado normal, con el cual se establece el flujo uniforme, siempre que el módulo de sección sea función continua y creciente del tirante y . La condición recíproca también se cumple, es decir, dados y_n , n y S hay un único gasto Q con el cual se establece el flujo uniforme y que se conoce como gasto normal.

Con el fin de tener una relación sin dimensiones, es conveniente dividir ambos miembros de la ec (2.34) entre una dimensión característica de la sección que puede ser el ancho de plantilla b si la sección es trapecial o rectangular, o bien el diámetro D si la sección es circular o herradura trabajando parcialmente llena. La dimensión característica debe tener como exponente a $8/3$ para obtener efectivamente una relación sin dimensiones. Así, de la ec (2.34) para las secciones rectangulares y trapecial se tiene:

$$\frac{A R_h^{2/3}}{b^{8/3}} = \frac{n Q}{b^{8/3} S^{1/2}} \tag{2.35}$$

para las secciones circular o herradura:

$$\frac{A R_h^{2/3}}{D^{8/3}} = \frac{n Q}{D^{8/3} S^{1/2}} \tag{2.36}$$

Con el fin de simplificar los cálculos, en la fig 2.7 se presentan las curvas que relacionan cualquiera de los dos términos de las ecs 2.35 y 2.36 con los valores y/b o y/D para las distintas secciones indicadas. En estas curvas, k representa la designación del talud para la sección trapecial.

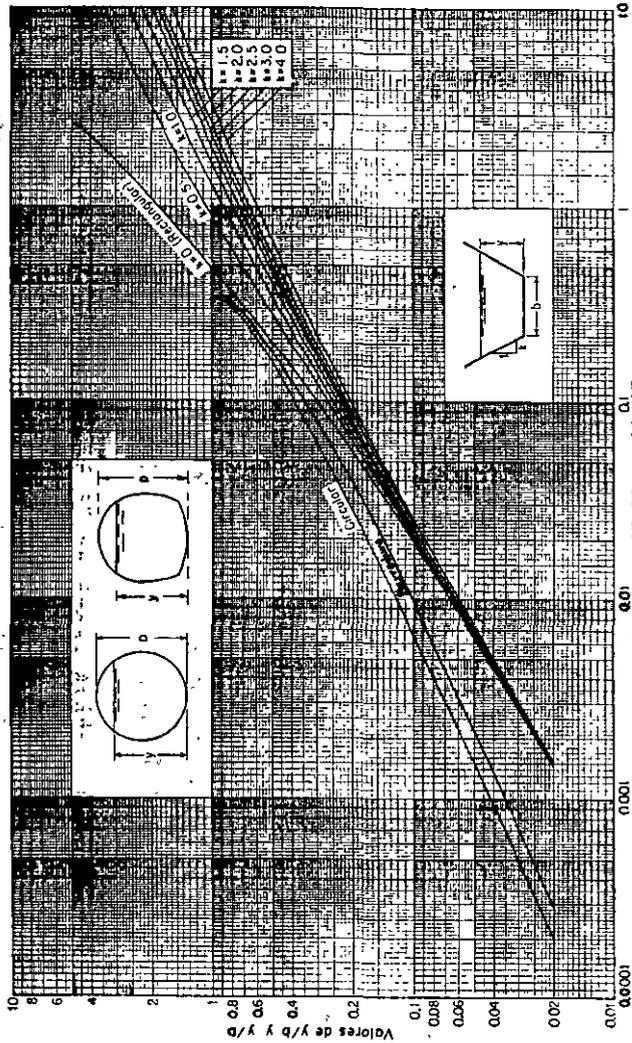


Fig. 2.7 — Curvas para determinar el tirante normal

En ciertos problemas, resulta conveniente tener una precisión mayor que la dada por la fig 2.7. Para secciones circular y herradura se recomienda utilizar las tablas 2.5 y 2.6, donde se muestran las propiedades geométricas más importantes de ambas secciones.

2.8 Canales de sección compuesta

En ocasiones, la sección transversal de un canal puede estar compuesta de varias subsecciones de forma y rugosidad distinta. Por ejemplo, la sección de un canal aluvial o de la rectificación de un río en una ciudad, ambos expuestos a avenidas, consisten comunmente de un canal principal, generalmente menos rugoso y más profundo y por lo mismo con velocidad media más alta, y los laterales.

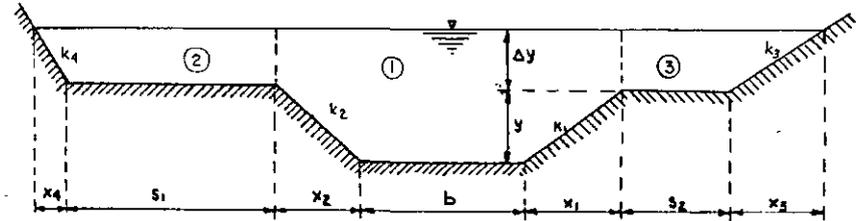


Fig 2.8 Canal de sección compuesta

El cálculo de una sección compuesta se realiza aplicando separadamente la fórmula de Manning para cada subsección y obteniendo la velocidad media de la misma y el gasto correspondiente. La suma de estos gastos proporciona el total.

Si A_1, A_2, \dots, A_n representan las áreas de cada subsección, de la ec (2.31), las velocidades medias respectivas son

$$v_1 = \frac{K_1}{A_1} S^{1/2}, \quad v_2 = \frac{K_2}{A_2} S^{1/2} \dots, \quad v_n = \frac{K_n}{A_n} S^{1/2}$$

donde K_1, K_2, \dots, K_n son los factores de conducción de las subsecciones y S la pen-

Tabla 2.5. Elementos geométricos en canales de sección circular.

D diámetro R_h radio hidráulico Q gasto cuando el tirante y es el crítico
 y tirante g aceleración de gravedad

y/D	A/D^2	R_h/D	A/R_h^3 D^3	$Q/\sqrt{g}D^{3/2}$	E_{crit}/D	y/D	A/D^2	R_h/D	A/R_h^3 D^3	$Q/\sqrt{g}D^{3/2}$	E_{crit}/D	y/D	A/D^2	R_h/D	A/R_h^3 D^3	$Q/\sqrt{g}D^{3/2}$	E_{crit}/D
0.01	0.0013	0.0096	0.0000	0.0001	0.0133	0.31	0.2074	0.1755	0.0650	0.0981	0.4221	0.66	0.5409	0.2909	0.2107	0.4198	0.9502
0.02	0.0047	0.0132	0.0002	0.0004	0.0267	0.32	0.2167	0.1801	0.0620	0.1044	0.4361	0.67	0.5594	0.2917	0.2160	0.4309	0.9674
0.03	0.0099	0.0177	0.0005	0.0010	0.0401	0.33	0.2260	0.1849	0.0736	0.1107	0.4502	0.68	0.5887	0.2935	0.2510	0.4437	0.9848
0.04	0.0165	0.0222	0.0009	0.0017	0.0534	0.34	0.2355	0.1891	0.0776	0.1172	0.4643	0.69	0.5780	0.2950	0.2568	0.4506	1.0025
0.05	0.0241	0.0278	0.0015	0.0027	0.0668	0.35	0.2450	0.1935	0.0820	0.1241	0.4784	0.70	0.5872	0.2962	0.2608	0.4604	1.0204
0.06	0.0334	0.0345	0.0022	0.0039	0.0803	0.36	0.2546	0.1978	0.0864	0.1310	0.4926	0.71	0.5964	0.2973	0.2651	0.4681	1.0386
0.07	0.0447	0.0424	0.0031	0.0053	0.0937	0.37	0.2642	0.2020	0.0900	0.1381	0.5068	0.72	0.6054	0.2981	0.2702	0.4911	1.0577
0.08	0.0580	0.0513	0.0041	0.0070	0.1071	0.38	0.2739	0.2061	0.0955	0.1453	0.5211	0.73	0.6143	0.2995	0.2751	0.5100	1.0719
0.09	0.0737	0.0611	0.0052	0.0091	0.1206	0.39	0.2836	0.2102	0.1020	0.1528	0.5354	0.74	0.6231	0.3000	0.2794	0.5248	1.0952
0.10	0.0919	0.0725	0.0065	0.0110	0.1341	0.40	0.2934	0.2142	0.1050	0.1603	0.5497	0.75	0.6318	0.3017	0.2810	0.5392	1.1188
0.11	0.1127	0.0855	0.0080	0.0132	0.1476	0.41	0.3032	0.2181	0.1100	0.1682	0.5640	0.76	0.6401	0.3025	0.2888	0.5540	1.1439
0.12	0.1361	0.0999	0.0107	0.0157	0.1611	0.42	0.3132	0.2220	0.1147	0.1761	0.5781	0.77	0.6489	0.3032	0.2910	0.5695	1.1705
0.13	0.1621	0.1167	0.0137	0.0184	0.1746	0.43	0.3229	0.2257	0.1196	0.1844	0.5931	0.78	0.6573	0.3037	0.2960	0.5849	1.1977
0.14	0.1907	0.1359	0.0170	0.0214	0.1881	0.44	0.3328	0.2294	0.1245	0.1927	0.6076	0.79	0.6655	0.3040	0.3008	0.6011	1.2255
0.15	0.2221	0.1575	0.0207	0.0248	0.2017	0.45	0.3428	0.2331	0.1298	0.2011	0.6223	0.80	0.6730	0.3042	0.3045	0.6177	1.2540
0.16	0.2564	0.1817	0.0247	0.0287	0.2153	0.46	0.3527	0.2366	0.1348	0.2098	0.6369	0.81	0.6815	0.3044	0.3082	0.6347	1.2833
0.17	0.2937	0.2084	0.0290	0.0330	0.2293	0.47	0.3627	0.2400	0.1401	0.2186	0.6517	0.82	0.6893	0.3044	0.3118	0.6521	1.3135
0.18	0.3340	0.2377	0.0337	0.0379	0.2436	0.48	0.3727	0.2434	0.1452	0.2275	0.6665	0.83	0.6969	0.3044	0.3154	0.6697	1.3447
0.19	0.3784	0.2695	0.0388	0.0432	0.2584	0.49	0.3827	0.2467	0.1505	0.2366	0.6814	0.84	0.7043	0.3044	0.3188	0.6877	1.3770
0.20	0.4269	0.3038	0.0443	0.0490	0.2737	0.50	0.3927	0.2500	0.1558	0.2459	0.6964	0.85	0.7115	0.3043	0.3212	0.7058	1.4115
0.21	0.4795	0.3407	0.0501	0.0553	0.2894	0.51	0.4027	0.2531	0.1610	0.2553	0.7114	0.86	0.7180	0.3026	0.3240	0.7240	1.4477
0.22	0.5363	0.3802	0.0563	0.0621	0.3055	0.52	0.4127	0.2561	0.1664	0.2650	0.7265	0.87	0.7251	0.3017	0.3261	0.7424	1.4855
0.23	0.5974	0.4224	0.0629	0.0694	0.3220	0.53	0.4227	0.2591	0.1715	0.2748	0.7417	0.88	0.7320	0.3008	0.3280	0.7611	1.5248
0.24	0.6628	0.4674	0.0699	0.0771	0.3390	0.54	0.4327	0.2620	0.1772	0.2848	0.7570	0.89	0.7380	0.2996	0.3307	0.7801	1.5655
0.25	0.7325	0.5153	0.0773	0.0853	0.3564	0.55	0.4426	0.2649	0.1825	0.2949	0.7724	0.90	0.7445	0.2980	0.3321	0.8285	1.6080
0.26	0.8067	0.5661	0.0851	0.0940	0.3743	0.56	0.4526	0.2676	0.1878	0.3051	0.7879	0.91	0.7501	0.2967	0.3336	0.8586	1.6525
0.27	0.8854	0.6200	0.0933	0.1032	0.3926	0.57	0.4625	0.2703	0.1933	0.3158	0.8035	0.92	0.7550	0.2951	0.3345	0.8917	1.7000
0.28	0.9687	0.6771	0.1019	0.1129	0.4113	0.58	0.4723	0.2728	0.1987	0.3263	0.8193	0.93	0.7612	0.2922	0.3350	0.9269	1.7500
0.29	1.0566	0.7374	0.1109	0.1230	0.4304	0.59	0.4822	0.2753	0.2041	0.3373	0.8354	0.94	0.7662	0.2896	0.3353	0.9725	1.7985
0.30	1.1491	0.8009	0.1203	0.1336	0.4500	0.60	0.4920	0.2776	0.2092	0.3484	0.8519	0.95	0.7707	0.2864	0.3349	1.0212	1.8465
0.61	0.5018	0.2797	0.2116	0.3560	0.8672	0.96	0.7719	0.2830	0.3149	1.0888	1.9485	1.00	0.7854	0.2500	0.3117	1.8988	2.0400
0.62	0.5115	0.2818	0.2190	0.3710	0.8855	0.98	0.7816	0.2735	0.3291	1.3050	2.3758	1.01	0.7816	0.2665	0.3248	1.5554	2.0400
0.63	0.5212	0.2839	0.2252	0.3830	0.8999	0.99	0.7841	0.2665	0.3400	1.5554	2.6400	1.00	0.7854	0.2500	0.3117	1.8988	2.0400
0.64	0.5308	0.2860	0.2302	0.3945	0.9100	1.00	0.7841	0.2500	0.3400	1.5554	2.6400	1.00	0.7854	0.2500	0.3117	1.8988	2.0400
0.65	0.5404	0.2881	0.2358	0.4066	0.9200	1.00	0.7854	0.2500	0.3400	1.5554	2.6400	1.00	0.7854	0.2500	0.3117	1.8988	2.0400

Tabla 2.6 Elementos geométricos en canales de sección de herradura.

D Diámetro de la herradura
 y tirante
 R_h Radio hidráulico
 g aceleración de gravedad
 Q gasto cuando el tirante y es el crítico.
 E_{crit} Energía específica mínima

y/D	A/D^2	R_h/D	A/R_h^3 D^3	$Q/\sqrt{g}D^{3/2}$	E_{crit}/D	y/D	A/D^2	R_h/D	A/R_h^3 D^3	$Q/\sqrt{g}D^{3/2}$	E_{crit}/D
0.01	0.0019	0.0068	0.00007	0.0008	0.0133	0.31	0.2074	0.1755	0.0650	0.0981	0.4221
0.02	0.0070	0.0093	0.00030	0.0030	0.0267	0.32	0.2167	0.1801	0.0620	0.1044	0.4361
0.03	0.0140	0.0120	0.00070	0.0070	0.0401	0.33	0.2260	0.1849	0.0736	0.1107	0.4502
0.04	0.0220	0.0150	0.00120	0.0120	0.0534	0.34	0.2355	0.1891	0.0776	0.1172	0.4643
0.05	0.0310	0.0180	0.00170	0.0170	0.0668	0.35	0.2450	0.1935	0.0820	0.1241	0.4784
0.06	0.0410	0.0210	0.00220	0.0220	0.0803	0.36	0.2546	0.1978	0.0864	0.1310	0.4926
0.07	0.0520	0.0240	0.00270	0.0270	0.0937	0.37	0.2642	0.2020	0.0900	0.1381	0.5068
0.08	0.0640	0.0270	0.00320	0.0320	0.1071	0.38	0.2739	0.2061	0.0955	0.1453	0.5211
0.09	0.0770	0.0300	0.00370	0.0370	0.1206	0.39	0.2836	0.2102	0.1020	0.1528	0.5354
0.10	0.0910	0.0330	0.00420	0.0420	0.1341	0.40	0.2934	0.2142	0.1050	0.1603	0.5497
0.11	0.1060	0.0360	0.00470	0.0470	0.1476	0.41	0.3032	0.2181	0.1100	0.1682	0.5640
0.12	0.1220	0.0390	0.00520	0.0520	0.1611	0.42	0.3132	0.2220	0.1147	0.1761	0.5781
0.13	0.1390	0.0420	0.00570	0.0570	0.1746	0.43	0.3229	0.2257	0.1196	0.1844	0.5931
0.14	0.1570	0.0450	0.00620	0.0620	0.1881	0.44	0.3328	0.2294	0.1245	0.1927	0.6076
0.15	0.1760	0.0480	0.00670	0.0670	0.2017	0.45	0.3428	0.2331	0.1298	0.2011	0.6223
0.16	0.1960	0.0510	0.00720	0.0720	0.2153	0.46	0.3527	0.2366	0.1348	0.2098	0.6369
0.17	0.2170	0.0540	0.00770	0.0770	0.2293	0.47	0.3627	0.2400	0.1401	0.2186	0.6517
0.18	0.2390	0.0570	0.00820	0.0820	0.2436	0.48	0.3727	0.2434	0.1452	0.2275	0.6665
0.19	0.2620	0.0600	0.00870	0.0870	0.2584	0.49	0.3827	0.2467	0.1505	0.2366	0.6814
0.20	0.2860	0.0630	0.00920	0.0920	0.2737	0.50	0.3927	0.2500	0.1558	0.2459	0.6964
0.21	0.3110	0.0660	0.00970	0.0970	0.2894	0.51	0.4027	0.2531	0.1610	0.2553	0.7114
0.22	0.3370	0.0690	0.01020	0.1020	0.3055	0.52	0.4127	0.2561	0.1664	0.2650	0.7265
0.23	0.3640	0.0720	0.01070	0.1070	0.3220	0.53	0.4227	0.2591	0.1715	0.2748	0.7417
0.24	0.3920	0.0750	0.01120	0.1120	0.3390	0.54	0.4327	0.2620	0.1772	0.2848	0.7570
0.25	0.4210	0.0780	0.01170	0.1170	0.3564	0.55	0.4426	0.2649	0.1825	0.2949	0.7724
0.26	0.4510	0.0810	0.01220	0.1220	0.3743	0.56	0.4526	0.2676	0.1878	0.3051	0.7879
0.27	0.4820	0.0840	0.01270	0.1270	0.3926	0.57	0.4625	0.2703	0.1933	0.3158	0.8035
0.28	0.5140	0.0870	0.01320	0.1320	0.4113	0.58	0.4723	0.2728	0.1987	0.3263	0.8193
0.29	0.5470	0.0900	0.01370	0.1370	0.4304	0.59	0.4822	0.2753	0.2041	0.3373	0.8354
0.30	0.5810	0.0930	0.01420	0.1420	0.4500	0.60	0.4920	0.2776	0.2092	0.3484	0.8519
0.61	0.5018	0.2797	0.2116	0.3560	0.8672	0.96	0.7719	0.2830	0.3149	1.0888	1.9485
0.62	0.5115	0.2818	0.2190	0.3710	0.8855	0.98	0.7816	0.2735	0.3291	1.3050	2.3758
0.63	0.5212	0.2839	0.2252	0.3830	0.8999	0.99	0.7841	0.2665	0.3400	1.5554	2.6400
0.64	0.5308	0.2860	0.2302	0.3945	0.9100	1.00	0.7841	0.2500	0.3400	1.5554	2.6400
0.65	0.5404	0.2881	0.								

diente general del canal,

El gasto total será

$$Q = VA = \sum_{i=1}^n V_i A_i = \sum_{i=1}^n K_i S^{1/2}$$

$$Q = \left(\sum_{i=1}^n K_i \right) S^{1/2} \quad (2.37)$$

y la velocidad media de toda la sección

$$V = \frac{\left[\sum_{i=1}^n K_i \right] S^{1/2}}{A}$$

Los coeficientes de distribución de velocidades α y β de la sección total se pueden calcular a partir de las velocidades medias en cada subsección.

De su definición

$$\alpha = \frac{1}{A} \iint_A \left(\frac{v}{V} \right)^3 dA \approx \frac{1}{A} \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i K_i^3 / A_i^2)}{\left(\sum_{i=1}^n K_i \right)^3 / A^3}$$

$$\alpha \approx A^2 \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i K_i^3 / A_i^2)}{\left(\sum_{i=1}^n K_i \right)^3} \right] \quad (2.38)$$

En la misma forma,

$$\beta \approx A \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i K_i^2 / A_i)}{\left(\sum_{i=1}^n K_i \right)^2} \right] \quad (2.39)$$

En el cálculo del perímetro mojado de la sección central o de las laterales

siés normalmente no se incluye Δy debido a que sobre la intercara entre ambas se tiene un esfuerzo cortante más pequeño que en el caso de la frontera sólida del canal.

Problema 2.2 Un canal rectangular de cemento pulido y ancho de plantilla $b = 2 \text{ m}$ tiene una pendiente $S = 0,000126$. b) Calcular el gasto que conduce para un tirante $y = 1,50 \text{ m}$. b) Calcular el gasto para $y = 0,50 \text{ m}$ y $S = 0,008$. Utilizar la fórmula de Manning Strickler en ambos casos.

Solución a. El área, perímetro y radio hidráulico son

$$A = 2 \times 1,5 = 3 \text{ m}^2$$

$$P = 2 + 2 \times 1,5 = 5 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{3}{5} = 0,6 \text{ m}$$

De la fórmula de Manning, para $n = 0,011$, la velocidad vale

$$V = \frac{1}{0,011} (0,6)^{2/3} (0,000126)^{1/2} = 0,726 \text{ m/seg}$$

y el gasto

$$Q = 3 \times 0,726 = 2,178 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Solución b. Haciendo cálculos análogos, se obtiene:

$$A = 2 \times 0,5 = 1 \text{ m}^2$$

$$P = 2 + 2 \times 0,5 = 3 \text{ m}$$

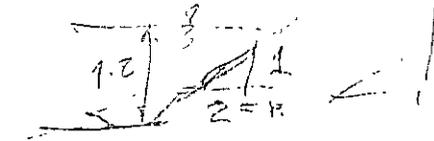
$$R_h = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ m}$$

$$V = \frac{1}{0,011} (0,33)^{2/3} (0,008)^{1/2} = 3,909 \text{ m/seg}$$

$$Q = 1 \times 3,909 = 3,909 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Problema 2.3 Calcular el gasto en un canal de sección trapezoidal con $b = 2 \text{ m}$ de ancho de plantilla, $y = 1,20 \text{ m}$ de tirante, taludes $k = 2$, pendiente $S = 0,000667$ y cuyas paredes están construídas de concreto rugoso bien acabado. Utilizar las fórmulas de Kutter, Bazin, Kozeny y Manning-Strickler para comparar resultados.

Solución. Los elementos geométricos de la sección son:



$$A = (2 + 2 \times 1.2) \cdot 1.2 = 5.28 \text{ m}^2$$

$$P = 2 + 2\sqrt{1 + 2^2} \cdot 1.2 = 7.367 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{5.28}{7.367} = 0.717 ; R_h^{1/2} = 0.847$$

$$R_h^{1/6} = (0.717)^{1/6} = 0.946$$

$$S^{1/2} = (0.000667)^{1/2} = 0.02583$$

Handwritten notes:
 $Z = 1.2 \times 2 \times (1.2) / 2$
 $1.2 \times 2 \times (1.2)$
 $1.2 \times 2 \times (1.2)$

a) De la tabla 2.3, para la fórmula de Kutter, $m = 0.65$

$$C = \frac{100 \times 0.847}{0.65 + 0.847} = 56.58$$

De la fórmula de Chezy (ec 2.3.b)

$$V = 56.58 \times 0.847 \times 0.02583 = 1.238 \text{ m/seg}$$

$$Q = 5.28 \times 1.238 = 6.536 \text{ m}^3/\text{seg}$$

b) Para la fórmula de Bazin, (de la tabla 2.3) $B = 0.45$

$$C = \frac{87}{1 + \frac{0.45}{0.847}} = 56.81$$

$$V = \frac{56.81}{56.58} \times 1.238 = 1.243 \text{ m/seg}$$

$$Q = 5.28 \times 1.243 = 6.554 \text{ m}^3/\text{seg}$$

c) Para la fórmula de Kozeny, de la tabla 2.3 $N_c = 60$. El ancho de la superficie libre en la sección vale

$$B = b + 2k \cdot y = 2 + 2 \times 2 \times 1.2 = 6.80 \text{ m}$$

y el tirante hidráulico

$$Y = \frac{A}{B} = \frac{5.28}{6.8} = 0.776 \text{ m}$$

De la fórmula de Kozeny (tabla 2.2)

$$e = 20 \log 0.776 + 60 = -2.2 + 60$$

$$C = 57.8$$

$$V = \frac{57.8}{56.58} \times 1.238 = 1.265 \text{ m/seg}$$

$$Q = 5.28 \times 1.265 = 6.678 \text{ m}^3/\text{seg}$$

d) Para la fórmula de Manning-Strickler, $n = 0.017$ (concreto no terminado)

$$C = \frac{0.946}{0.017} = 55.647$$

$$V = \frac{55.647}{56.58} \times 1.238 = 1.218 \text{ m/seg}$$

$$Q = 5.28 \times 1.218 = 6.429 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Problema 2.4 Una galería circular (fig 2.9) de cemento pulido liso de 2 m de diámetro y 1.50 m de tirante debe conducir un gasto de 2.6 m³/seg. Calcular la pendiente necesaria para que el flujo sea uniforme.

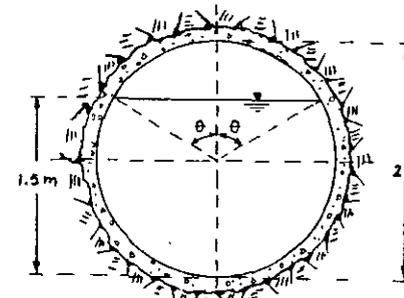


Fig 2.9. Sección del túnel del problema 2.4.

Solución. Se tiene que

$$\cos \theta = \frac{1}{2}, \theta = 60^\circ$$

El área, perímetro y radio hidráulico valen:

$$A = \frac{D^2}{4} \left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) = 2.527 \text{ m}^2$$

$$P = 2\pi \frac{D}{2} \frac{2}{3} = 4.189 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = 0.603 \text{ m}$$

$$R_h^{2/3} = 0.714$$

La velocidad media

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2.6}{2.527} = 1.029 \text{ m/seg}$$

Para $n = 0.011$, de la fórmula de Manning la pendiente debe ser:

$$S = \left(\frac{Vn}{R_h^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{1.029 \times 0.011}{0.714} \right)^2 = 0.000251$$

Problema 2.5 En el canal mostrado en la fig 2.10 se desea salvar la barranca mediante un sifón invertido cuya geometría se muestra. Determinar el desnivel Δz necesario para que el gasto circule en la tubería sin producir remanso hacia aguas arriba. La sección del canal es rectangular de 3.00 m de plantilla, su tirante normal $y_n = 1.075$ m y su pendiente $S = 0.001$. El coeficiente de fricción de Manning en el canal es $n = 0.0135$. La longitud total del tubo es de 200 m y este es de concreto bien acabado, siendo $n = 0.012$.

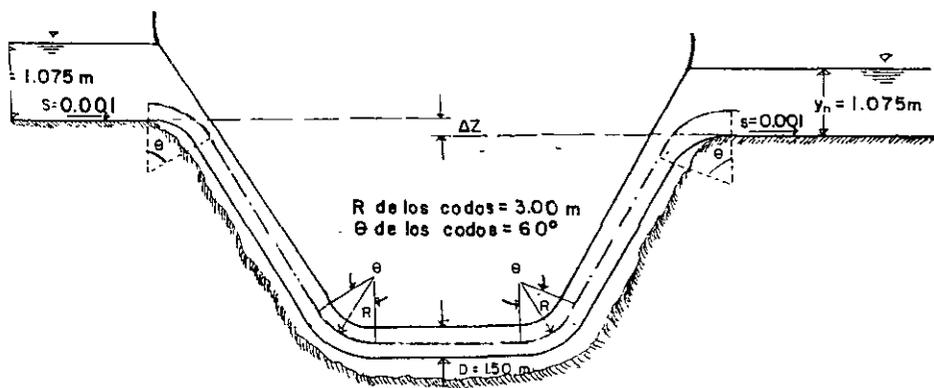


Fig. 2.10 Ilustración del problema 2.5

Solución. Los elementos geométricos del canal son

$$A = 3.00 \times 1.075 = 3.225 \text{ m}^2$$

$$P = 3.00 + 2 \times 1.075 = 5.15 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{3.225}{5.20} = 0.62 \text{ m}$$

$$R_h^{2/3} = 0.727$$

$$S^{1/2} = 0.0316$$

De la fórmula de Manning

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} = \frac{3.225 \times 0.727 \times 0.0316}{0.0135} = 5.488 \text{ m}^3/\text{seg}$$

que es el gasto que debe circular por el sifón.

De la ecuación de la energía antes y después del sifón resulta

$$\Delta z + y_n + \frac{V_n^2}{2g} = y_n + \frac{V_n^2}{2g} + \sum h$$

$$\Delta z = \sum h$$

Esto es, el desnivel Δz debe ser igual a las pérdidas en el sifón. La

velocidad y carga de velocidades en el mismo son

$$V = \frac{5.488}{0.785 (1.5)^2} = 3.106 \text{ m/seg}$$

$$\frac{V^2}{2g} = 0.492 \text{ m}$$

Con $R_h = D/4 = 0.375$ m, de la fórmula de Manning la pérdida por fricción en el sifón vale

$$h_f = \left(\frac{V_n}{R_h^{2/3}} \right)^2 L = \left(\frac{3.106 \times 0.012}{(0.375)^{2/3}} \right)^2 200 = 1.027 \text{ m}$$

La pérdida de los cuatro cambios de dirección es

$$h_c = 4 \times 0.24 \frac{60}{90} \times 0.52 = 0.333 \text{ m}$$

y el desnivel vale

$$\Delta z = 1.027 + 0.333 = 1.36 \text{ m}$$

Problema 2.6 Un canal de sección trapecial revestido de concreto pulido ($n = 0.015$) tiene un ancho de plantilla $b = 2.50$ m, taludes $k = 1.5$ y pendiente $S = 0.00075$. ---

Calcular el tirante para que conduzca un gasto $Q = 20 \text{ m}^3/\text{seg}$ en flujo uniforme.

Solución. De los datos se obtiene que:

$$A = (b + ky) y = (2.5 + 1.5 y) y$$

$$P = b + 2 \sqrt{1 + k^2} \quad y = 2.5 + 3.6 y$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{0.00075} = 0.0274$$

De la fórmula de Manning

$$Q = 20 = \frac{A}{0.015} R_h^{2/3} 0.0274 = 1.826 A R_h^{2/3}$$

Por lo tanto

$$A R_h^{2/3} = 10.954$$

$$\frac{A R_h^{2/3}}{b^{8/3}} = \frac{10.954}{(2.5)^{8/3}} = 0.951$$

De la fig 2.7, con $k = 1.5$, $y_n/b = 0.76$, por tanto

$$y_n = 0.76 \times 2.5 = 1.90 \text{ m}$$

que sería el tirante normal con la precisión dada por la fig 2.7. Por un procedimiento de tanteos se podría aproximar mejor dicho resultado, como se indica en la siguiente tabla

y (m)	A (m ²)	P (m)	R _h (m)	R _h ^{2/3}	A R _h ^{2/3}	A R _h ^{2/3}
1.875	9.961	9.26	1.075	1.05	10.46 ≠	10.92
1.90	10.165	9.351	1.087	1.057	10.75 ≠	10.92
1.915	10.288	9.405	1.094	1.062	10.92 =	10.92

luego entonces el tirante correcto es $y_n = 1.915 \text{ m}$.

Problema 2.7 Un canal trapecial excavado en tierra tiene un tirante $y_n = 1.4 \text{ m}$, talud $k = 2$, pendiente $S = 0.004$ y debe conducir un gasto de $8 \text{ m}^3/\text{seg}$. Calcular su ancho de plantilla.

Solución. Los elementos geométricos son

$$A = (b + ky) y = (b + 2 \times 1.4) 1.4 = (b + 2.8) 1.4$$

$$P = b + 2 \sqrt{1 + k^2} \quad y = b + 2 \sqrt{1 + 4} \quad 1.4 = b + 6.26$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{0.0004} = 0.02$$

Para un canal en tierra $n = 0.025$ y de la fórmula de Manning

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} = \frac{0.02}{0.025} A R_h^{2/3} = 0.8 A R_h^{2/3}$$

$$A R_h^{2/3} = \frac{8}{0.8} = 10$$

El procedimiento de solución es por tanteos

b (m)	A (m ²)	P (m)	R _h (m)	R _h ^{2/3}	A R _h ^{2/3}	A R _h ^{2/3}
4.0	9.52	10.26	0.928	0.951	9.057 ≠	10
4.5	10.22	10.76	0.95	0.966	9.875 ≠	10
4.6	10.36	10.86	0.954	0.969	10.04 ≈	10

luego entonces $b = 4.60 \text{ m}$

Problema 2.8 La rectificación de un río que atraviesa una ciudad se piensa realizar mediante un canal cuya sección tiene la forma mostrada en la fig 2.8 con la siguiente geometría $b = 40 \text{ m}$, $k_1 = k_2 = 2$, $k_3 = k_4 = 3$, $y_1 = 2.2 \text{ m}$, y $\Delta y = 1 \text{ m}$. El canal en la época de avenidas debe conducir un gasto máximo $Q = 320 \text{ m}^3/\text{seg}$ con un tirante total $y = 3.20 \text{ m}$ y una pendiente $S = 0.00035$. Calcular el ancho de las ampliaciones laterales $s = s_1 = s_2$ las cuales tendrían un factor de rugosidad $n_2 = 0.035$ y de $n_1 = 0.025$ para la zona central.

Solución. Zona central 1. Los elementos geométricos son

$$A = (40 + 2 \times 2.2) 2.2 + (40 + 2 \times 2 \times 2.2) \times 1$$

$$A = 97.68 + 48.8 = 146.48 \text{ m}^2$$

$$P = 40 + 2 \sqrt{1 + 2^2} \times 2.2 = 49.839 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{146.48}{49.839} = 2.939 \text{ m}$$

$$(R_h)^{2/3} = 2.052$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{0.00035} = 0.0187$$

luego el gasto que conduce la parte central es

$$Q = \frac{146.48}{0.025} \times 2.052 \times 0.0187 = 224.91 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Por lo tanto, el gasto de las ampliaciones debe ser: $320 - 224.91 = 95.09$

$\text{m}^3/\text{seg}.$

Zonas laterales 2

$$\text{Haciendo } s_1 + s_2 = 2s$$

$$A = (2s + 3 \times 1) \times 1 = 2s + 3$$

Con $R_h \approx 1 \text{ m}$

$$Q = \frac{2s + 3}{0.035} \times 1 \times 0.0187 = 95.09$$

$$s = \left(\frac{95.09 \times 0.035}{0.0187} - 3 \right) \frac{1}{2} = 87.49 \text{ m}$$

Cada ampliación tendrá un ancho de 87.49 m

2.9

Conductos cerrados parcialmente llenos

Las fórmulas de fricción que utilizan exclusivamente el radio hidráulico para caracterizar la forma del perfil, en secciones circulares proporcionan el mismo valor de la velocidad para un llenado parcial a la mitad que para el lleno total, ya que en ambos casos el radio hidráulico posee la misma magnitud $D/4$. Esto se observa en las curvas con líneas de puntos Q/Q_0 y V/V_0 mostradas en la fig 2.11 (sección circular) y en la 2.12 (sección herradura) donde el subíndice cero, que corresponde a la condición de lleno total, hace los resultados adimensionales.

Dichas curvas muestran valores máximos en el caso de sección circular:

para sección circular y $n = \text{cte} \therefore$

$$Q_{\text{max}} \text{ cuando } \frac{y}{D} = 0.938 \quad \text{y} \quad V_{\text{max}} \text{ cuando } \frac{y}{D} = 0.81$$

si $\frac{y}{D} > 0.81 \rightarrow$ existe además otro tirante para el mismo Q .

para el gasto con índices de llenado $y/D = 0.938$ y para la velocidad con $y/D = 0.81$.

Es más, la curva adimensional Q/Q_0 muestra que cuando el tirante es mayor que $0.82 D$ - se pueden tener dos tirantes distintos para un mismo gasto, uno arriba y otro abajo del valor $0.938 D$.

Análogamente, la curva adimensional V/V_0 muestra que cuando $y \geq 0.5 D$ se tienen dos tirantes distintos para la misma velocidad, uno arriba y otro abajo del valor $0.81 D$.

La anterior discusión es válida bajo la suposición de que el factor de fricción, - (en este caso n de Manning) permanece constante para cualquier valor de y/D .

Yarnell - Woodward y Büllow determinaron experimentalmente un crecimiento constante del gasto hasta llegar a un máximo que corresponde a $y/D = 0.95$.

— Straub hizo mediciones en conductos de concreto y determinó un máximo de Q para y/d -

ligeramente inferior a 1. Estas discrepancias se explican por el hecho de que la resistencia al movimiento actúa no solo en el perímetro mojado sino también sobre la superficie -

libre del agua a través de la fricción con el aire.

Se han hecho varios intentos de corregir este efecto. Camp (ref 2), utilizando un factor de fricción n variable con y , corrige las curvas de puntos de la fig 2.11 -

para obtener la verdadera variación $Q - y$ y $V - y$. Sin embargo, se prefiere aquí la ley de variación debida a Kozeny para conductos circulares, quien corrige su fórmula original

(ec 8.95 del Vol 1) para conductos a presión, a la forma

$$V = (8.86 \log y + N) \left(\frac{y}{D} \right)^{1/6} \sqrt{SD} \quad (2.40)$$

en el caso de que funcione parcialmente lleno. Los resultados para conductos circulares -

se muestran en la fig 2.11 y su extrapolación para conductos herradura en la fig 2.12.

Cuando el conducto es de Asbesto-Cemento y trabaja parcialmente lleno, se recomienda la fórmula de Ludin

$$V = K_L R_h^{0.65} S^{0.54}$$

en que K_L varía de 134 para $V \geq 0.8 \text{ m/seg}$ y 122 para $V \leq 0.3 \text{ m/seg}$

Subíndice "o" indica condición de lleno total

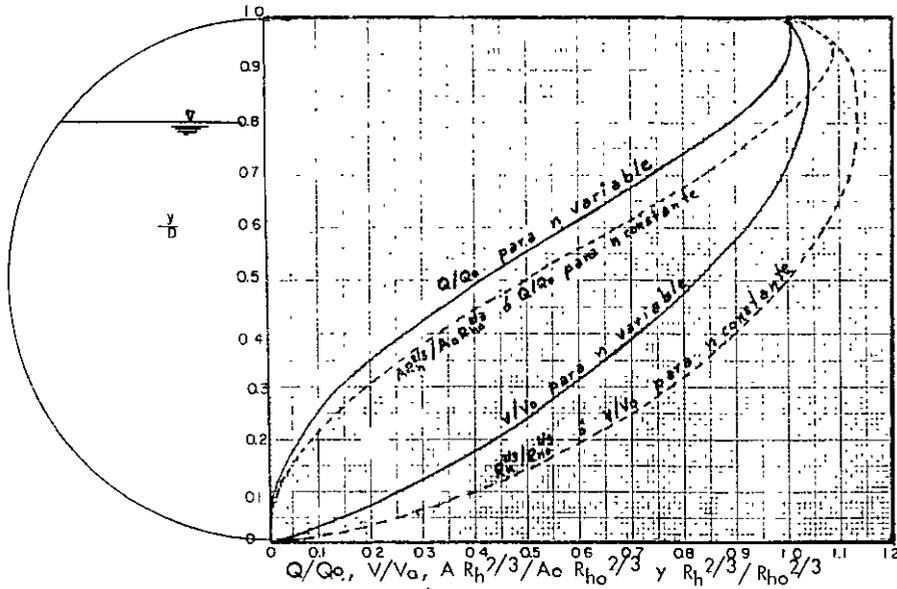
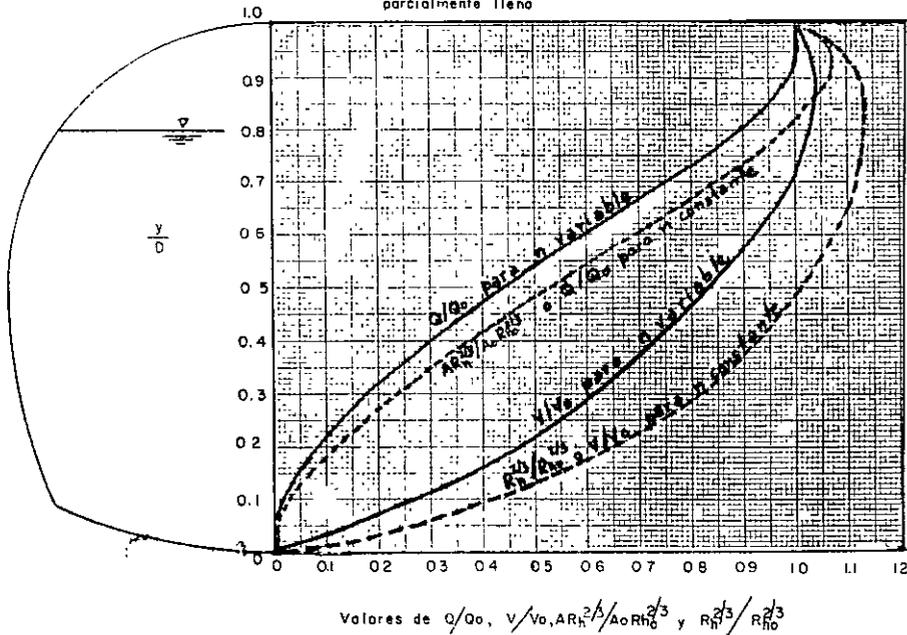


Fig 2.11 Características del flujo en un conducto circular parcialmente lleno, según Kozeny (ref 15)

Fig 2.12 Características del flujo en un conducto herradura parcialmente lleno



Problema 2.9 Una alcantarilla de concreto de sección circular debe conducir un gasto $Q = 450$ lt/seg con una pendiente $S = 0.001125$. Calcular el diámetro necesario de tal manera que el tirante sea $y = 0.8 D$.

Solución Se elige $n = 0.011$ para la fórmula de Manning. Con $y/d = 0.8$, de la fig 3.11 se obtiene $Q/Q_o = 0.89$ (para n variable), luego el gasto para lleno total es

$$Q_o = \frac{0.45}{0.89} = 0.506 \text{ m}^3/\text{seg}$$

siendo el área y radio hidráulico

$$A_o = 0.7854 D^2$$

$$R_{ho} = \frac{D}{4} = 0.25 D$$

$$R_{ho}^{2/3} = 0.397 D^{2/3}$$

$$S^{1/2} = (0.001125)^{1/2} = 0.0335$$

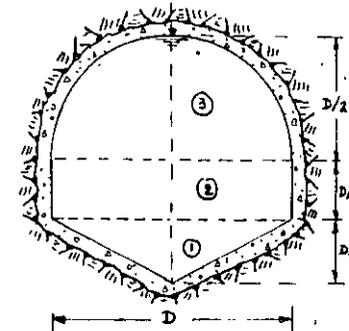
y de la fórmula de Manning para lleno total

$$Q = \frac{0.7854 D^2}{0.011} \cdot 0.397 D^{2/3} \times 0.0335 = 0.506 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$D^{8/3} = \frac{0.506 \times 0.011}{0.7854 \times 0.397 \times 0.0335} = 0.532$$

$$D = 0.79 \text{ m}$$

Problema 2.10 Un túnel revestido de concreto bien acabado tiene la forma mostrada en

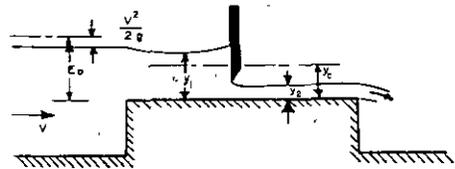


en la fig 2.13, con pendiente $S = 0.0004$ y diámetro $D = 1.60$ m. a) Calcular la velocidad media y el gasto que transporta a tubo lleno. b) Determinar el tirante que se establecería si el túnel fuese de sección herradura de diámetro $D = 1.60$ m, para el mismo gasto y pendiente.

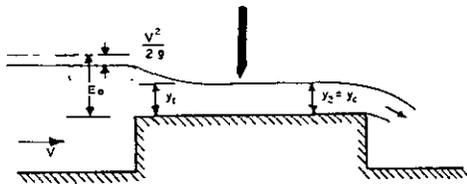
Fig 2.13. Sección del túnel del problema 2.10.

Se ha establecido así otra propiedad importante del estado crítico, no sólo proporciona la energía específica mínima para un gasto unitario dado, sino también el gasto máximo para una energía específica dada. Para este último caso, la energía específica E_0 , es la mínima con la cual puede pasar el gasto máximo a través de la sección.

El concepto de energía específica constante se puede ilustrar con el comportamiento del flujo en la vecindad de una compuerta deslizante situada cerca del punto medio de una porción sobreelevada de la plantilla del canal (fig 3.8a y b). La energía específica E_0 (referida al nivel de la porción sobreelevada) se considera constante.



a) Compuerta parcialmente levantada



b) Compuerta totalmente levantada

Fig 3.8 Compuerta deslizante actuando como control sobre una zona de plantilla sobreelevada

Cuando la compuerta se encuentra cerrada, el tirante y_1 aguas arriba es igual a E_0 , mientras el de aguas abajo y_2 es cero. Si la compuerta se levanta parcialmente una cantidad menor que y_c , el perfil de la superficie adopta la condición — $y_1 > y_c$ y $y_2 < y_c$, como se muestra en la fig 3.8a. Para un levantamiento total

de la compuerta los niveles aguas arriba y aguas abajo deben ser los mismos: $y_1 = y_2 = y_c$ y el gasto debe ser el máximo, creando así las condiciones de flujo de un vertedor de cresta ancha.

Problema 3.2 Las condiciones aguas arriba de una contracción en el ancho de un canal rectangular son como las indicadas en el problema 3.1. El ancho del canal se contrae gradualmente de 3m a 2.70 m sin existir cambio en la elevación de la plantilla. Determinar el tirante dentro de la contracción.

Solución:

De los resultados del problema 3.1 la energía específica en la sección 1 vale:

$$E_1 = 1.60 + 0.08 = 1.68 \text{ m}$$

teniendo E_2 este mismo valor debido a que el nivel de plantilla no cambia. Sin embargo, el gasto unitario q_2 es distinto de $2 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$ de la sección 1 debido al cambio en el ancho del canal. Dicho gasto resulta de la ecuación de continuidad

$$q_2 = 2 \frac{3}{2.70} = 2.222 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$$

Por lo tanto:

$$E_2 = y_2 + \frac{q_2^2}{2g y_2^2} = y_2 + \frac{0.252}{y_2^2} = 1.68$$

cuyas soluciones son: $y_2 = 1.58 \text{ m}$ ó 0.453 m . De nuevo aquí, solo el valor subcrítico — $y_2 = 1.58 \text{ m}$ es posible. La solución a este problema puede también ser trazada sobre la curva E-y dibujada sobre la fig 3.7. Para este caso se observa que se puede tratar como el de la variación del gasto con la energía específica constante de la fig 3.7. En efecto, si bien el gasto total no varía, la modificación en el ancho origina un cambio del gasto unitario existiendo una curva del tipo de la fig 3.7. Si las condiciones en la sección de aguas arriba corresponden al régimen subcrítico, esto implica que dichas condiciones quedarían representadas por un punto sobre la rama superior de la curva. Para pasar a la

sección 2 con la misma energía específica y un gasto unitario mayor, sería necesario desplazarse sobre la curva hacia la derecha (sin rebasar el máximo) con una reducción del tirante, tal como lo señalan los resultados obtenidos al pasar de 1.60 m a 1.58 m.

3.3.3 Cálculo del tirante crítico

Las condiciones teóricas en que se desarrolla el régimen crítico están dadas por la ec (3.4b). Considerando que $\alpha = 1$ dicha ecuación es:

$$\frac{Q_c}{\sqrt{g}} = \frac{A_c^{3/2}}{B_c^{1/2}} \quad (3.6)$$

La ec (3.6) indica que dada la forma de la sección en un canal y el gasto, existe un tirante crítico único y viceversa. Como un criterio general, dicho tirante queda definido al satisfacer dicha ecuación cualquiera que sea la forma de la sección. Sin embargo, para las secciones más usuales se han desarrollado fórmulas más sencillas, o bien gráficas para un cálculo más rápido del tirante crítico.

Sección rectangular. Para un canal rectangular de ancho de plantilla b , la ec (3.6) se escribe

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = \frac{b^{3/2} y_c^{3/2}}{b^{1/2}}$$

de donde, al hacer $q = Q/b$ (gasto unitario) el tirante crítico vale:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (3.7)$$

Esta ecuación permite el cálculo directo del tirante crítico en una sección rectangular. Sustituyendo en ella $q = V_c y_c$, resulta que

$$\frac{y_c}{2} = \frac{V_c^2}{2g}$$

y de la ec (3.2) se obtiene

$$E_{mín} = y_c + \frac{y_c}{2} = \frac{3}{2} y_c \quad (3.8)$$

Sección trapezoidal. Para un ancho de plantilla b y talud k , la ec (3.6) resulta:

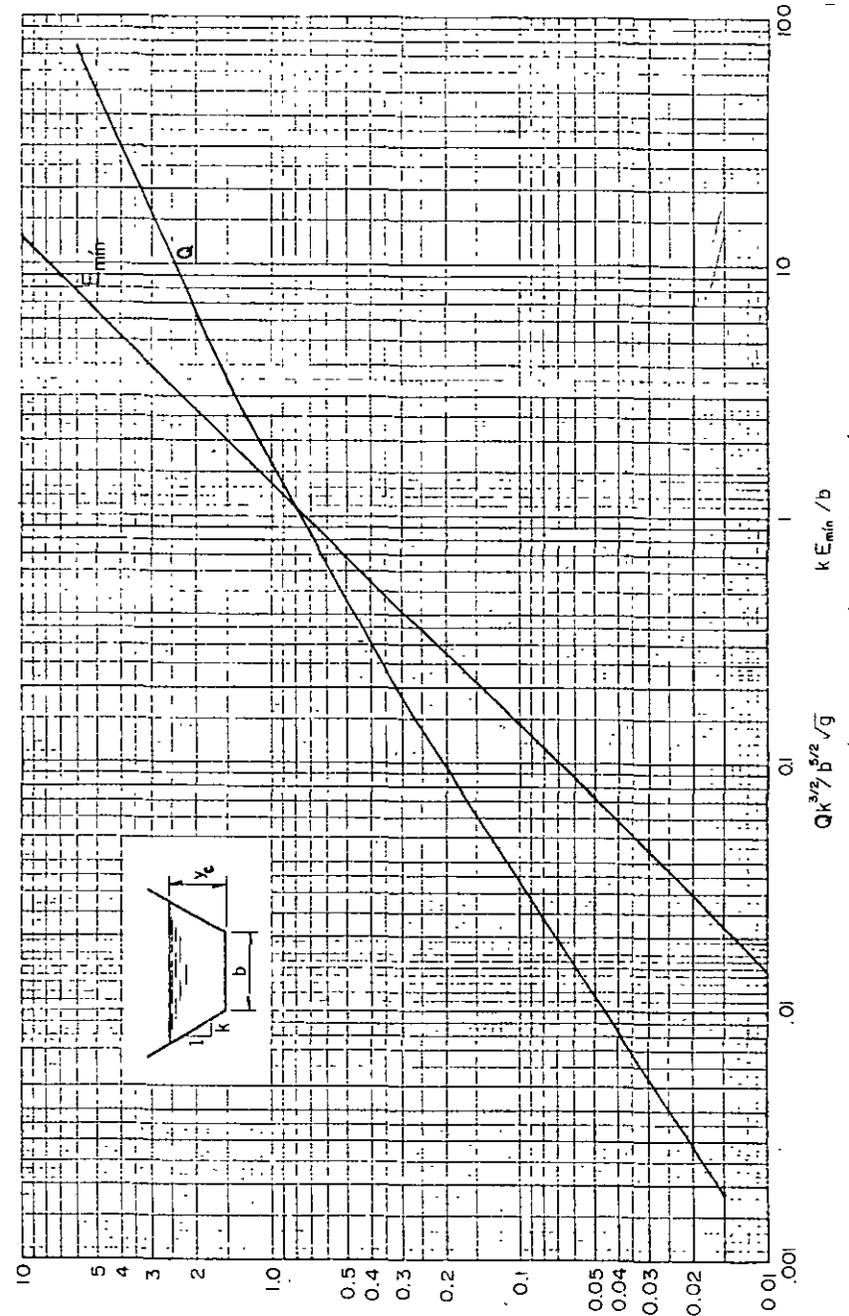


Fig. 3.9 Curvas para determinar el tirante crítico y energía específica-mínima en secciones trapezoidales.

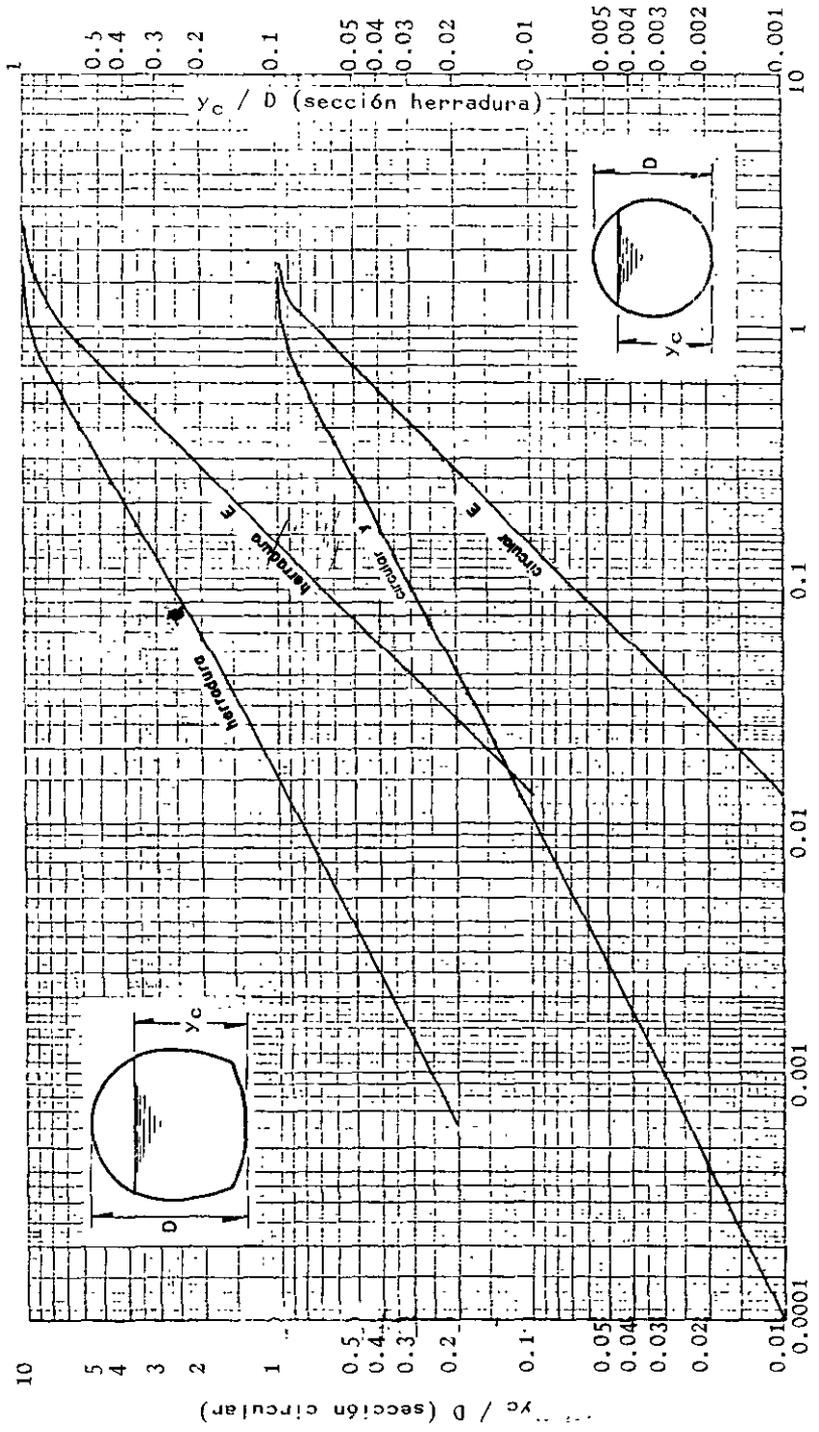


Fig 3.10 Curvas para determinar el tirante crítico y energía específica mínima en secciones circular y herradura.

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = \left[\frac{(b + k y_c)^3 y_c^3}{b + 2 k y_c} \right]^{1/2} \quad (3.9a)$$

o bien, multiplicando ambos miembros por $k^{3/2} / b^{5/2}$, se obtiene

$$\frac{Q k^{3/2}}{b^{5/2} \sqrt{g}} = \left(k \frac{y_c}{b} \right)^{3/2} \left[\frac{(1 + k \frac{y_c}{b})^3}{1 + 2 k \frac{y_c}{b}} \right]^{1/2} \quad (3.9b)$$

Las condiciones de régimen crítico deberán satisfacer la ec 3.9b y para simplificar los cálculos, en la fig 3.9 se presenta la curva que relaciona los términos de dicha ecuación. Dicha figura permite hacer una determinación suficientemente precisa del tirante crítico cuando se conoce el gasto y la geometría de la sección.

Es posible obtener también una relación entre el tirante crítico y la energía específica mínima. En efecto, sustituyendo $\frac{2 y_c^2}{2g}$ de la ec (3.4a) en la 3.2, se obtiene que:

$$E_{mín} = y_c + \frac{A_c}{2 B_c} = \frac{2 y_c B_c + A_c}{2 B_c}$$

Además, sustituyendo $A_c = (b + k y_c) y_c$, $B_c = b + 2 k y_c$ en la ecuación anterior, resulta lo siguiente:

$$E_{mín} = \frac{2 (b + 2 k y_c) y_c + (b + k y_c) y_c}{2 (b + 2 k y_c)}$$

Esta ecuación se puede simplificar y escribir con términos adimensionales como sigue :

$$\frac{k E_{mín}}{b} = \frac{3 + 5 (k y_c / b)}{2 / (k y_c / b) + 4} \quad (3.10)$$

En la fig 3.9 se presenta gráficamente la ec 3.10 y permite hacer un cálculo suficientemente preciso de la energía específica mínima cuando se conoce el tirante crítico o viceversa.

Sección circular y herradura. De la ec (3.6) se puede plantear una ecuación semejante

a la (3.9a) para estas dos secciones, como sigue:

$$\frac{Q}{D^{5/2} \sqrt{g}} = f \left(\frac{y_c}{D} \right)$$

En la fig 3.10 se presentan las curvas para estas secciones que permiten obtener el tirante crítico cuando se conoce el gasto en el canal y en las tablas 2.5 y 2.6 los mismos valores. De manera semejante al canal trapezoidal, se puede derivar una ecuación del tipo siguiente:

$$\frac{E_{mín}}{D} = f \left(\frac{y_c}{D} \right)$$

que permite obtener la energía específica mínima en un canal circular cuando se conoce el tirante crítico o viceversa. En la fig 3.10 se presenta gráficamente la ecuación anterior.

Sección triangular. Para esta forma de sección de talud k en las orillas, se hace $b = 0$ en la ec (3.9a) y se obtiene:

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = \left(\frac{k^3 y_c^6}{2k y_c} \right)^{1/2} = \left(\frac{k^2 y_c^5}{2} \right)^{1/2} \quad (3.11 a)$$

Despejando resulta:

$$y_c = \sqrt[5]{\frac{2 Q^2}{g k^2}} \quad (3.11 b)$$

Esta ecuación permite realizar el cálculo directo del tirante crítico.

Sustituyendo la ec (3.11 a) en la (3.2) resulta:

$$E_{mín} = y_c + \frac{y_c}{4}$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$E_{mín} = \frac{5}{4} y_c \quad (3.12)$$

ecuación que también permite el cálculo directo de la energía específica mínima cuando

se conoce el tirante crítico o viceversa.

Sección parabólica. Se considera que esta sección es simétrica respecto a un eje vertical y que el área hidráulica se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$A = c y^{3/2}$$

donde c es una constante que depende de la forma de la parábola.

La derivada de la energía específica respecto del tirante igualada con cero

es:

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy} \left(y + \frac{Q^2}{2g c^2 y^3} \right) = 1 - \frac{3 Q^2}{2g c^2 y^4} = 0$$

y despejando el tirante crítico

$$y_c = \sqrt[4]{\frac{3 Q^2}{2g c^2}} \quad (3.13)$$

Además, despejando de esta ecuación a Q y sustituyendo en la ec (3.2),

resulta:

$$E_{mín} = y_c + \frac{c^2 y_c^4}{3 c^2 y_c^3}$$

y de aquí:

$$E_{mín} = \frac{4}{3} y_c \quad (3.14)$$

3.3.4 Pendiente crítica

El estado o régimen crítico en la sección de un canal existe cuando el tirante y la velocidad adquieren los valores críticos para un gasto dado. Si dicha situación se desea hacer extensiva a lo largo de un canal prismático, ello equivale a que dicho canal tenga un flujo uniforme de tirante normal igual al crítico. La pendiente de plantilla S_c necesaria para que ello ocurra recibe el nombre de "crítica".

Si un flujo uniforme se presenta en un canal con pendiente menor que la

crítica ($S_0 < S_c$), el flujo es con régimen subcrítico y la pendiente se llama "subcrítica" o más comúnmente "suave". Por el contrario, si el flujo uniforme es con pendiente mayor que la crítica ($S_0 > S_c$), el régimen es supercrítico y la pendiente se llama "supercrítica" o "pronunciada".

Un estado de flujo uniforme cerca del crítico es inestable debido a que un cambio menor en la energía específica causarían un cambio grande del tirante, como puede observarse en la fig 3.2. Los cambios menores en la energía específica pueden deberse a cambios de rugosidad de una sección a otra, depósitos de sedimentos o cambios de sección.

De lo anterior se observa que el tirante crítico y la energía específica tienen un papel muy importante en el flujo en canales. En particular, la relación única que existe entre velocidad y tirante para la condición crítica significa que tiene gran utilidad para aplicaciones prácticas en la medición de flujos y en el establecimiento de puntos de control.

Problema 3.3 Un canal rectangular de 2 m de ancho de plantilla debe conducir un gasto de 3 m³/seg. Calcular la energía específica mínima necesaria para conducir dicho gasto.

Solución

El gasto por unidad de ancho vale :

$$q = \frac{3}{2} = 1.5 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$$

De la ec (3.7) el tirante crítico es

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{(1.5)^2}{9.8}} = 0.612 \text{ m}$$

La velocidad crítica y su correspondiente carga de velocidad son:

$$V_c = \frac{1.5}{0.611} = 2.45 \text{ m}/\text{seg}$$

$$\frac{V_c^2}{2g} = 0.306 \text{ m}$$

y la energía específica mínima es

$$E = 0.612 + 0.306 = 0.918 \text{ m}$$

Obsérvese que el número de Froude crítico vale: $Fr_c = 2.45 / \sqrt{9.8 \times 0.612} = 1$, lo cual verifica la ec (3.4a).

Problema 3.4. Un canal trapecial tiene un ancho de plantilla $b = 2.50 \text{ m}$, taludes $k = 1.5$ y debe conducir un gasto de 20 m³/seg. Calcular el tirante crítico, la energía específica mínima y la pendiente crítica para un factor de rugosidad $n = 0.015$.

Solución

De acuerdo con los datos, se obtiene

$$\frac{Q k^{3/2}}{\sqrt{g} b^{5/2}} = \frac{20 (1.5)^{3/2}}{\sqrt{9.8} (2.5)^{5/2}} = 1.188$$

De la fig 3.9 resulta que $k y_c/b = 0.85$, por lo cual

$$y_c = \frac{0.85 \times 2.5}{1.5} = 1.42 \text{ m}$$

Si se desea un valor más preciso de y_c , es necesario resolver la ec (3.4b)

por aproximaciones sucesivas

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{(20)^2}{9.8} = 40.82$$

Siendo el área hidráulica crítica:

$$A_c = (b + k y_c) y_c = (2.5 + 1.5 y_c) y_c$$

y el ancho crítico de la superficie libre:

$$B_c = b + 2 k y_c = 2.5 + 3 y_c$$

Por lo cual, se debe cumplir que

$$\frac{A_c^3}{B_c} = \frac{[(2.5 + 1.5 y_c) y_c]^3}{2.5 + 3 y_c} = 40.82$$

La solución se resume en la siguiente tabla:

y_c	A_c	A_c^3	B_c	A_c^3/B_c	
1,42	6,575	284	6,76	42,0	\neq 40,82
1,41	6,507	275,53	6,73	40,94	\doteq 40,82

Por lo tanto, el tirante crítico correcto es $y_c = 1.41$ m. La velocidad —

crítica vale

$$V_c = \frac{20}{6,507} = 3,074 \text{ m/seg}$$

y de la ec (3.4a) el número de Froude crítico es:

$$Fr_c = 3,074 / \sqrt{9,8 \times 6,507 / 6,73} = 1$$

lo cual verifica dicha ecuación. La carga de velocidad crítica vale

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{(3,074)^2}{19,6} = 0,482 \text{ m}$$

y la energía específica mínima

$$E_{mín} = 1,41 + 0,482 = 1,892 \text{ m}$$

o bien, para $k y_c/b = 1,5 \times 1,41/2,5 = 0,85$, de la misma fig 3.9 resulta que — — —

$k E_{mín}/b = 1,14$ y por tanto:

$$E_{mín} = \frac{1,14 \times 2,5}{1,5} = 1,90 \text{ m} \approx 1,892$$

Finalmente, el perímetro mojado y radio hidráulico son:

$$P_c = b + 2\sqrt{1+k^2} y_c = 2,5 + 2\sqrt{1+2,25} \cdot 1,41 = 7,58 \text{ m}$$

$$R_{hc} = \frac{6,507}{7,58} = 0,358 \text{ m}; \quad R_{hc}^{2/3} = 0,903$$

De la fórmula de Manning, la pendiente crítica es:

$$S_c = \left(\frac{V_c n}{R_{hc}^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{3,074 \times 0,015}{0,903} \right)^2 = 0,0026$$

Problema 3.5. Una galería circular de 2,50 m de diámetro debe conducir un gasto de —

15 m³/seg. Calcular el tirante crítico y la energía específica mínima con la cual puede conducir dicho gasto, aceptando que $\alpha = 1,05$.

Solución

Para tomar en cuenta α , es suficiente con introducirlo dividiendo a g en el cálculo del parámetro:

$$\frac{Q}{\sqrt{g/\alpha}} / D^{5/2} = \frac{15}{\sqrt{9,8/1,05}} / 2,5^{5/2} = 0,4968$$

De la fig 3.10 resulta que $\frac{y_c}{D} = 0,72$ y de aquí

$$y_c = 0,72 \times 2,5 = 1,8 \text{ m}$$

Para $y_c/D = 0,72$ de la fig 3.11 resulta que $E_{mín}/D = 1,06$ y por lo —

tanto:

$$E_{mín} = 1,06 \times 2,5 = 2,64 \text{ m.}$$

Problema 3.6 Las condiciones de flujo aguas abajo de una cierta sección de un canal rectangular imponen que escurra un gasto de 80 m³/seg con una energía específica de — 2,50 m. ¿Si el canal tiene un ancho de plantilla de 18 m, a cuánto deben reducirse dicho ancho o el tirante para que se produzca un cambio de régimen?

Solución.

Al obligar a que 2,50 m sea la energía específica mínima con que escurra el gasto dado, de las ecs (3.7) y (3.8) resulta que:

$$E_{mín} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \min g}} = 2,50 \text{ m}$$

Por lo tanto, el ancho mínimo sería:

$$b_{mín} = \frac{1,5^{3/2} Q}{\sqrt{g E_{mín}^{3/2}}} = \frac{1,5^{3/2} \times 80}{\sqrt{9,8 \times 2,5^{3/2}}} = 11,877 \text{ m}$$

Si en lugar de reducir el ancho más bien se construye un umbral, se tendría que:

$$E_{mín} = 1,5 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} = 1,5 \sqrt[3]{\frac{80^2}{18^2 \times 9,81}} = 1,895 \text{ m}$$

y la altura del umbral deberá ser:

$$s = 2,50 - 1,895 = 0,605 \text{ m}$$

Problema 3.7. Determinar el gasto que escurre sobre un vertedor rectangular de cresta -
ancha, como el de la fig 3,8b y comparar el resultado con el del problema 1.3.

Solución .

Puesto que se forma el tirante crítico sobre la plataforma, para $\alpha = 1$
de la ec (3.7) resulta:

$$q = \sqrt{g y_c^3}$$

Siendo el gasto total para un ancho b de cresta:

$$Q = \sqrt{g} b y_c^{3/2}$$

Además, de la ec (3.8) $y_c = \frac{2}{3} E_0$ que al sustituir en la ecuación ante-

rior resulta:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} b E_0^{3/2} = 1,704 b E_0^{3/2}$$

Esta ecuación no toma en cuenta la altura del umbral y es el resultado -
de aceptar que sobre la cresta se forma el tirante crítico. El valor C es mayor que el ob-
tenido en el problema 1.3.

Problema 3.8. Por la aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento, determi-
nar el tirante que se presenta en la sección final de un canal rectangular horizontal, a -
partir de la cual se inicia una caída libre (fig 3,10). Suponer para ello que en dicha sec-
ción la presión en el fondo es cero y que la sección crítica se presenta a una distancia x
hacia aguas arriba.

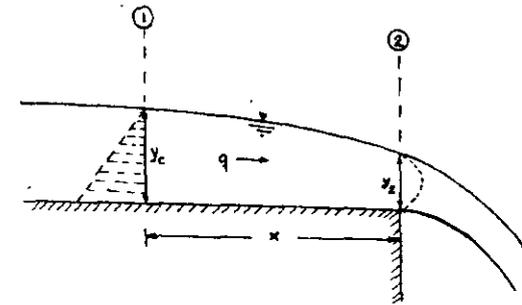


Fig 3,10 Tirante al inicio de una caída libre.

Solución

Siendo q el gasto por unidad de ancho, la ecuación de la cantidad de --
movimiento entre las secciones 1 y 2 (supuesto que el empuje hidrostático en 2 vale cero)
conduce a

$$\frac{1}{2} y_c^2 = \frac{q}{g} (V_2 - V_c) \quad (a)$$

y con la ecuación de continuidad

$$q = V_c y_c = V_2 y_2 \quad (b)$$

resulta

$$\frac{y_c^2}{2} + \frac{V_c^2}{g} y_c = \frac{V_2^2}{g} y_2 \quad (c)$$

Siendo 1 la sección crítica, la energía específica en dicha sección es E

y además

$$y_c = \frac{2}{3} E = \frac{V_c^2}{g} \quad (d)$$

Por lo tanto, de la ec (b)

$$\frac{V_2^2}{g} = \frac{V_c^2}{g} - \frac{y_c^2}{y_2^2}$$

$$\frac{V_2^2}{g} = \frac{V_c^2}{g} \frac{y_c^2}{y_2^2} = \frac{2}{3} E \frac{4}{9} \frac{E^2}{y_2^2} \quad (e)$$

Sustituyendo las ecs (d) y (e) en la (c) :

$$\frac{4}{2 \times 9} E^2 + \left(\frac{2}{3} E\right)^2 = \frac{8}{27} \frac{E^3}{y_2^2} y_2$$

Despejando a y_2 resulta :

$$y_2 = \frac{4}{9} E$$

o bien, de la ec (d)

$$y_2 = \frac{2}{3} y_c = 0.667 y_c$$

Experimentalmente, Rouse encontró que $y_2 = 0.715 y_c$ o sea un 7 por ciento mayor que el aquí encontrado. O'Brien también obtuvo que $x = 11.6 y_c$.

3.3.5 . Velocidad crítica y velocidad de la onda.

Con $\alpha = 1$, la ec (3.4 a) establece que la velocidad V_c en el estado crítico es igual a $\sqrt{g Y_c}$ que es la magnitud de la velocidad con que se propaga una onda larga de pequeña amplitud en agua de tirante Y_c . Ello da una interpretación física del estado crítico muy importante.

Existen dos tipos de ondas en el agua: las oscilatorias que se forman en el mar a cierta distancia de la costa y las ondas de "choque" que fueron discutidas en el problema 1.2. Las primeras se mueven sin pérdida sustancial de energía; por el contrario, las últimas tienen frentes turbulentos que rompen con pérdida sustancial de energía.

En los libros de hidrodinámica se demuestra que la celeridad de las ondas

de longitud grande (en comparación con la profundidad y) llega a tener un valor aproximado de \sqrt{gy} .

Se considera que la onda de choque se genera por el movimiento horizontal de una placa vertical en un canal que contiene agua en reposo, como se muestra en la fig 3.11. El argumento se restringe a ondas de choque de pequeña amplitud; la velocidad Δv de la placa es igual a la del agua que se encuentra entre el frente de onda y dicha placa. El frente inicia su movimiento hacia la izquierda tan pronto como lo hace la placa. La altura de la onda es Δy y su velocidad c que normalmente es mucho mayor que Δv .

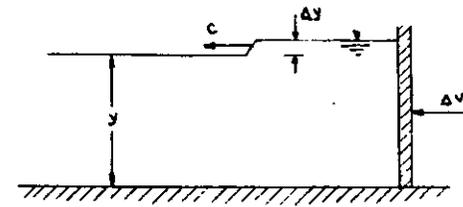


Fig. 3.11 Onda elemental de pequeña amplitud

El procedimiento normal de solución del problema es como se sugiere en el 1.2: el estado de flujo no permanente se cambia a permanente con el punto de vista del observador. Lo correcto es aplicar la ecuación de la cantidad de movimiento debido a que se disipa energía en el frente de onda; sin embargo, dado que la onda de choque es de pequeña amplitud, la disipación de energía es pequeña y puede usarse la ecuación de energía, como en el caso del problema 1.2, donde se obtuvo que $c = \sqrt{gy}$ (como en la onda oscilatoria).

Ambos argumentos se limitan a ondas largas de baja amplitud y este es el tipo de onda que se genera más a menudo en canales por la operación de controles y -

la existencia de obstrucciones. Se puede concluir que la velocidad de la onda $c = \sqrt{gy}$ es aquella con que un disturbio tiende a moverse sobre la superficie libre de un canal y que, por supuesto, es con relación al agua y no a los bordos del canal.

De la ec (3.4a), $V = \sqrt{g Y_c}$ en el estado crítico el agua se mueve con la misma velocidad (referida a los bordos) con que una onda, producida por un pequeño disturbio, se movería con respecto al agua. Un frente de dicha onda parecería estacionario a un observador colocado sobre el bordo. En el caso de que la onda se moviera hacia aguas arriba y hacia aguas abajo, el frente que se dirige en esta última dirección parecería al observador como si se moviera con el doble de velocidad que el agua. Por ello, las ondas estacionarias "son características del flujo que está en estado crítico o próximo a él. En el caso de un régimen subcrítico la velocidad es $V < \sqrt{g Y_c}$ y la onda producida por un disturbio puede moverse hacia aguas arriba. Cuando el régimen es supercrítico, $V > \sqrt{g Y_c}$, la onda es arrastrada hacia aguas abajo y ningún disturbio puede propagar su influencia hacia aguas arriba.

De acuerdo con estas consideraciones, un flujo subcrítico está sujeto a un "control" desde aguas abajo, debido a que cualquier disturbio puede transmitirse en dirección hacia aguas arriba. Si el flujo es supercrítico, no puede quedar influenciado por ninguna situación desde aguas abajo, quedando controlado desde aguas arriba. Por estas razones, entre los ingenieros prácticos se acostumbra decir que "en flujo supercrítico el agua no sabe lo que está ocurriendo del lado aguas abajo".



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**

PITOMETRÍA

CA 426

MÉTODOS DE AFORO

**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

FÓRMULA DE CHEZY

En 1769, el ingeniero francés Antoine Chézy estaba desarrollando la primera fórmula de flujo uniforme que se expresa como:

$$V = C\sqrt{R_h S}$$

Donde V es la velocidad media en m/seg, R_h es el radio hidráulico, en metros, S es la pendiente de la línea de energía, y C es un factor de resistencia al flujo, llamada C de Chészy.

Esta fórmula fue derivada a partir de dos supuestos. La primera suposición establece que la fuerza que se opone al flujo por unidad de área en la frontera del fondo del canal es proporcional al cuadrado de la velocidad; esto es, que dicha fuerza es igual a KV^2 , donde K es una constante de proporcionalidad. La superficie de contacto del flujo con la corriente del fondo del canal, es igual al producto del perímetro mojado y el largo del canal, o PL, (L el largo del canal), de forma que la fuerza total que resiste al flujo es igual a: KV^2PL .

La segunda suposición es que en un flujo uniforme, la componente efectiva de la fuerza de gravedad que produce el flujo debe ser igual a la fuerza total que se opone al flujo.

Tabla 2.2. Fórmulas usuales para el cálculo del factor de fricción C de Chezy. En estas fórmulas, R_h radio hidráulico en m, S pendiente hidráulica.		
Autor	Fórmula	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + (23 + \frac{0.00155}{S}) \frac{n}{R_h}}$	Se aconseja para canales naturales para los cuales usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es compleja y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n, donde n es un coeficiente que depende de la rugosidad del canal según tabla 2.3
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter y por tanto más sencilla. m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{B}{\sqrt{R_h}}}$	Está basada en una buena cantidad de experiencias y es relativamente sencilla. B es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Kozeny	$C = 20 \log Y + N_c$	es análoga a la de los tubos y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Mises y Bazin. Y es el tirante hidráulico en m y N_c un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Martínez	$C = 17.7 \log \frac{R_h}{d} + 13.6$	Fue obtenida de muchas mediciones en ríos de la Unión Soviética. d es el diámetro del grano del material en el fondo del río en m y vale para $0.15 \leq R_h \leq 2.25m$, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d \leq 0.25m$ (ref 12)
Manning - Strickler	$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$	Fue obtenida a partir de siete fórmulas diferentes basadas en ensayos de Bazin y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.4.
Pavlovski	$C = \frac{R_h^E}{n}$ <i>n, mismo coeficiente de rugosidad de Manning</i>	Considera que el exponente en la fórmula de Manning no es una constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad como sigue $E = 1.5/n$ para $R_h < 1m$ y $E = 1.3/\sqrt{n}$ para $R_h > 1m$.

FÓRMULA DE MANNING

En 1880, el ingeniero irlandés Robert Manning, con base en la fórmula de Chézy, presentó su fórmula que se expresa como:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Donde V es la velocidad media, en metros, R_h es el radio hidráulico, en metros, S es la pendiente de la línea de energía, y n es el coeficiente de rugosidad, mejor conocida como n de Manning.

Método de sección - pendiente

El uso directo de la fórmula de Manning para la determinación del gasto es conocido como método de sección – pendiente.

Para poder aplicar la fórmula de Manning es necesario conocer las características topográficas del tramo de río donde se desea aforar, así como el tirante. El tramo seleccionado debe tener una longitud recta de 300 metros y la sección elegida debe ser lo más uniforme posible. Debido a la sencillez, este método tiene gran aplicación.

Ejemplo: Determinar el caudal en un canal trapecial, usando la fórmula de Chezy y la de Manning, con los siguientes datos:

$$y = 1.20 \text{ m}$$

$$z = 2:1$$

$$S = 0.000667$$

$$n = 0.017$$

$$b = 2.0 \text{ m.}$$

Tabla 2.4. Factor de fricción, n, (de Manning)

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. CONDUCTOS CERRADOS DESCARGANDO PARCIALMENTE LLENOS			
A.1 Metales			
a) Latón liso	0.009	0.010	0.013
b) Acero			
1. Soldado	0.010	0.012	0.014
2. Remachado	0.013	0.016	0.017
c) Hierro fundido			
1. Pintado	0.010	0.013	0.014
2. Normal	0.011	0.014	0.016
d) Hierro forjado			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e) Metal corrugado			
1. Drenaje	0.017	0.018	0.021
2. Drenaje pluvial	0.021	0.024	0.030
A.2 No metales			
a) Lucita	0.008	0.009	0.010
b) Vidrio	0.009	0.010	0.013
c) Cemento			
1. Liso	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
d) Concreto			
1. Alcantarillado recto y libre de escombros	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarillado con curvas, conexiones y algunos escombros	0.011	0.013	0.014
3. Acabado	0.011	0.012	0.014
4. Drenajes rectos con ventanas de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
5. No acabados, en cimbra de acero	0.012	0.013	0.014
6. No acabados, en cimbra de madera lisa	0.012	0.014	0.016
7. No acabados en cimbra de madera bruta	0.015	0.017	0.020
e) Madera			
1. Duela	0.010	0.012	0.014
2. Laminada y tratada	0.015	0.017	0.020
f) Arcilla			
1. Tubos de barro cocido común	0.011	0.013	0.017
2. Tubos de albañal vitrificado	0.011	0.014	0.017
3. Tubos de albañal vitrificado con ventanas de inspección	0.013	0.015	0.017
3. Mampostería juntasada y aplastada con mortero de cemento	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería juntasada con mortero de cemento	0.020	0.025	0.030
5. Mampostería seca a volteo	0.020	0.030	0.035
e) Fondo de grava con lados de:			
1. Concreto cimbrado	0.017	0.020	0.025
2. Mampostería sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Mampostería seca a volteo	0.023	0.033	0.036
f) Ladrillo			
1. Vitricota	0.011	0.013	0.015
2. Con mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g) Mampostería			
1. Juntasada con mortero	0.017	0.025	0.030
2. Seca	0.023	0.032	0.035
h) Piedra labrada	0.013	0.015	0.017
i) Asfalto	0.013	0.013	
1. Liso	0.016	0.016	
2. Rugoso	0.030		0.500
j) Cubierta vegetal	0.030		0.500
C. CANALES EXCAVADOS O DRAGADOS EN			
a) Tierra, recto y uniforme			
1. Limpio recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de intemperizado	0.018	0.022	0.025
3. Grava, sección uniforme y limpia	0.022	0.025	0.030
4. Con poco pasto y poca hierba	0.022	0.027	0.033
b) Tierra, con curvas y en régimen lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pasto y algo de hierba	0.025	0.030	0.033
3. Hierba densa o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Planicie de tierra y mampostería en los lados	0.028	0.030	0.035
5. Piedra rocosa y hierba en los bordos	0.025	0.035	0.040
6. Planicie, intemperizado, y bordos limpios	0.030	0.040	0.050
c) Excavado o dragado en línea recta			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Pocos arbustos en los bordos	0.035	0.050	0.060
4. Tubo vitrificado para drenes con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
g) Mampostería			
1. De vitricota	0.011	0.013	0.015
2. Acabados con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h) Drenajes sanitarios cubiertos de lama con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016
i) Drenaje con fondo liso	0.016	0.019	0.020
j) Acabados de cemento rugoso	0.018	0.025	0.030
B. CANALES RECUBIERTOS O EN RE-LLENO			
B.1 Metales			
a) Superficies de acero lisas			
1. No pintadas	0.011	0.012	0.014
2. Pintadas	0.012	0.013	0.017
b) Corrugadas	0.021	0.025	0.030
B.2 No metales			
a) Cemento			
1. Superficie lisa	0.010	0.011	0.013
2. En mortero	0.011	0.013	0.015
b) Madera			
1. Plana, no tratada	0.010	0.012	0.014
2. Plana, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Rústica	0.011	0.013	0.015
4. Tablones y tejamanil	0.012	0.015	0.018
5. Cubierta con tela	0.010	0.014	0.017
c) Concreto			
1. Acabado con lana metálica	0.011	0.013	0.015
2. Acabado con lana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Acabado con grava en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin acabar	0.014	0.017	0.020
5. Gunitado, buena sección	0.016	0.019	0.023
6. Gunitado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca, excavado irregular	0.022	0.027	
d) Planicie de concreto, acabado con lana y taludes de:			
1. Mampostería cuidada sobre mortero	0.015	0.017	0.020
2. Mampostería burda sobre mortero	0.017	0.020	0.024
d) Cortes en rocas			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Astillado e irregular	0.035	0.040	0.050
e) Canales abandonados, hierba y arbustos sin limpiar			
1. Hierba densa, tan alta como el diámetro	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, arbustos en los taludes	0.040	0.050	0.080
3. Igual al anterior con máximo escurrimiento	0.045	0.070	0.110
4. Denso de arbustos, altos niveles de escurrimiento	0.080	0.100	0.140
D. CAUCES NATURALES			
D.1 Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas < 30 m)			
a) Corrientes en planicie			
1. Limpio, rectos, sin deslaves ni remansos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior pero más rocosos y con hierba	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, curvo, algunas irregularidades del fondo	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, algo de hierba y roca	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior pero menor profundidad y secciones poco eficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual que el 4 pero más rocas	0.045	0.050	0.060
7. Tramos irregulares con hierba y estanques profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con mucha hierba, estanques profundos, o cauces de avenidas con raíces y plantas subacuáticas	0.075	0.100	0.150
b) Corrientes de montañas, sin vegetación en el cauce; taludes muy pendientes, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes que quedan sumergidas en las avenidas			
1. Fondo de grava, boleó y algunos cantos rodados	0.030	0.040	0.050
2. Fondo de boleó y grandes rocas	0.040	0.050	0.070

DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLACA DE ORIFICIO

La ecuación general para calcular el gasto descargado a través de una placa de orificio es:

$$Q = \frac{CA\sqrt{2gh}}{[1 - (d/D)^4]^{1/2}}$$

Donde:

Q es el gasto, en $m^3/hora$.

A es el área del orificio, en m^2 .

g es la constante de aceleración de la gravedad, $9.81 m/s^2$.

h es la diferencia de presión entre la sección aguas arriba y la sección aguas debajo de la placa de orificio, en *m.c.a.*

C es el coeficiente de descarga del orificio, no tiene dimensiones y se determina por calibración en laboratorio. En el Cuadro I.7 se pueden ver los valores de C aproximados para diferentes valores $\beta = d/D$. Donde D , es el diámetro interno de la tubería y d , el del orificio en la placa. Se recomienda **no utilizar relaciones de β menores a 0.15**.

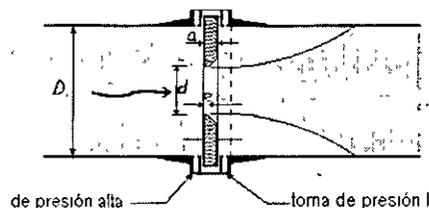


Figura I.11 - Elementos geométricos para el diseño de una placa de orificio.

Cuadro I.7. Coeficientes de descarga para medidores de placa de orificio.

Relación d/D	para Q en m^3/h	para Q en l/s
β	C	C
0.25	2174.4	604.0
0.30	2178.0	605.0
0.35	2181.6	606.0
0.40	2181.6	606.0
0.50	2185.2	607.5
0.65	2194.2	609.5
0.70	2199.6	611.0
0.75	2257.2	627.0
0.80	2314.8	643.0

Cuando se tiene una relación β , que queda entre los valores indicados en el cuadro I.7, se puede calcular el valor de C , en forma proporcional (interpolando).

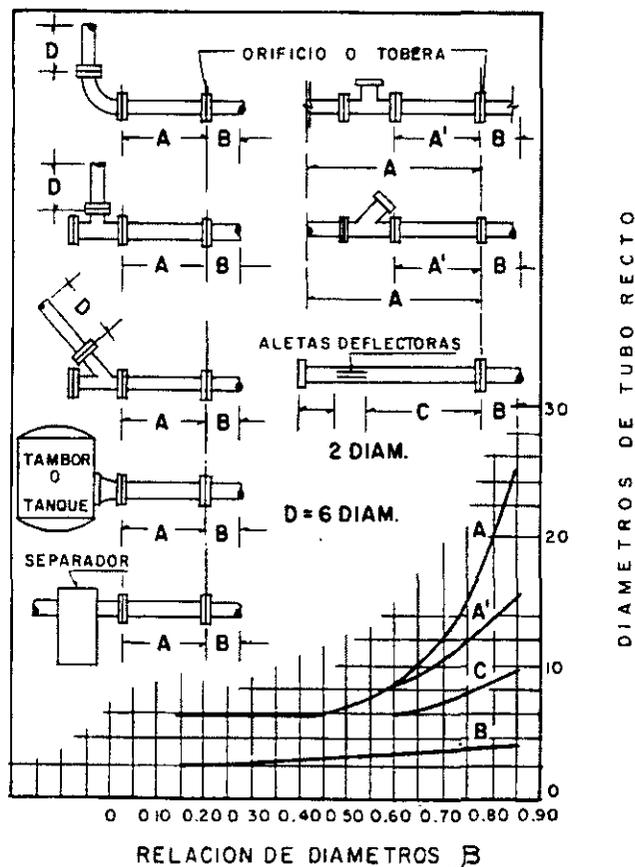
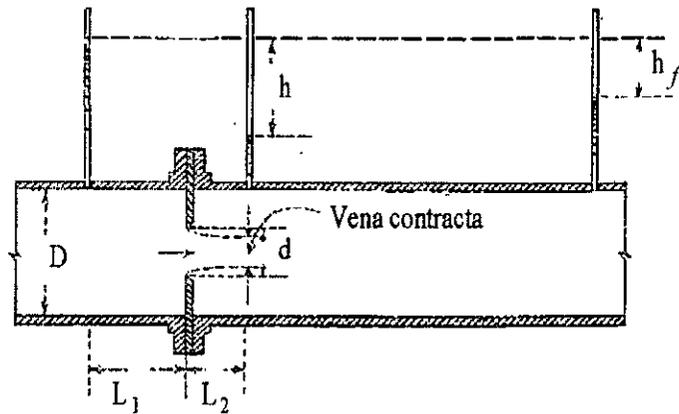
La pérdida de carga, h_f , se puede calcular en forma aproximada de acuerdo con la relación β como se indica en el cuadro siguiente:

$\beta =$	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.75
h_f , en % de h	96	92	85	76	67	55	48

El espesor de la placa debe ser adecuado para evitar que se doble bajo la fuerza del flujo y no debe exceder $1/50$ del diámetro de la tubería, D , o de $1/8$ del diámetro del orificio, d . El espesor de la placa puede exceder

estos límites de espesor con la condición de que el borde del orificio, que queda aguas abajo, esté biselado a un ángulo de 45° o menor.

Las tomas de presión se pueden colocar separadas de donde se coloca la placa de orificio o junto a las caras de la placa.



LOCALIZACION DEL PUNTO DE INSTALACION PARA PLACAS DE ORIFICIO CON ACCESORIOS EN UN MISMO PLANO

Ejemplo 1:

Calcular el gasto Q , en m^3/h , y la pérdida de carga para:

$$D = 8 \text{ pulgadas (200 mm = 0.20 m)}$$

$$d = 6 \text{ pulgadas (150 mm = 0.15m)}$$

$$h = 7.5 \text{ pies (7.5 pies} \times 0.3048 \text{ m/pie} = 2.286 \text{ m)}$$

$$A = \pi \times d^2/4 = 3.1416 \times (0.15)^2/4 = 0.01767 \text{ m}^2$$

$$\beta = d/D = 0.15/0.20 = 0.75$$

Del cuadro I.7, para $\beta = 0.75$, en m^3/h le corresponde $C = 2257.2$

$$Q = \frac{2257.2 \times 0.01767 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 2.286}}{[1 - (0.75)^4]^{1/2}} = 323.07 \text{ m}^3/h$$

La pérdida de carga, h_f , para $\beta = 0.75$ es de 48% de la carga h , por lo que resulta:

$$h_f = 0.48 \times 2.286 = 1.097 \text{ m}$$

Ejemplo 2:

Calcular el gasto Q , en m^3/h , cuando

$$d = 2.25 \text{ pulgadas (5.625 mm = 0.05625 m)}$$

$$D = 4 \text{ pulgadas (100 mm = 0.10 m)}$$

$$h = 8.4 \text{ pies (8.4 pies} \times 0.3048 \text{ m/pie} = 2.56032 \text{ m)}$$

$$A = \pi \times d^2/4 = 3.1416 \times (0.05715)^2/4 = 0.00256 \text{ m}^2$$

$$\beta = d/D = 2.25"/4" = 0.5625$$

Del cuadro I.7, para $\beta = 0.50$, en m^3/h le corresponde $C = 2185.2$ y para $\beta = 0.65$, en m^3/h le corresponde $C = 2194.2$.

Para $\beta = 0.5625$

$$C = 2185.2 + [(0.5625 - 0.50) \times (2194.2 - 2185.2) / (0.65 - 0.50)] = 2188.95$$

$$Q = \frac{2188.95 \times 0.00256 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 2.56032}}{[1 - (0.5625^4)]^{1/2}} = 41.867 \text{ m}^3/h$$

Por lo tanto, si se conoce el diámetro interno de la tubería, D , y aproximadamente el gasto a medir, Q , y la diferencia de presión, h , entonces el diámetro del orificio se puede determinar por tanteos.

Ejemplo 3:

Se desea medir un $Q \approx 40 \text{ m}^3/h$ (11.11 Lts/seg), $D = 4''$ (100 mm), $h \approx 50 \text{ cm} = 0.50 \text{ m}$,

Se propone $d = 3''$ (75 mm), por lo que $\beta = 3/4 = 0.75$ y $C = 2257.2$,

Entonces:

$$A = 3.1416 \times 0.075^2/4 = 0.0044 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{2257.2 * 0.00441 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.50}}{[1 - (0.75^4)]^{1/2}} = 37.776 \text{ m}^3 / h$$

Como el valor obtenido ($37.776 \text{ m}^3/h$) está muy cercano al valor que se supone se va a medir ($40.0 \text{ m}^3/h$), entonces se acepta el diseño de una placa de orificio de 75 mm de diámetro, para una tubería con diámetro interno de 100 mm.

El espesor del borde de la placa, e , no debe ser mayor a $D/50$ ($100/50 = 2 \text{ mm}$), por lo que se elige un espesor $a = 4.5 \text{ mm}$ ($3/16''$) para la placa, con un bisel a 45° .

MEDIDORES DE PROPELA

Los medidores de propela constan de una propela o hélice (en metal o plástico), montada en el interior de un tubo, con su eje de rotación paralelo a la dirección del flujo. La velocidad de rotación de la propela es proporcional a la velocidad del flujo y el caudal se calcula con el área de la sección transversal; para esto, la propela está conectada a una cabeza que registra el caudal y el volumen.

Estos medidores, de acuerdo con su tamaño (de 3 a 42 pulgadas), pueden medir gastos desde 4.5 hasta 7,790 m³/hora.

Los medidores tipo propela se fabrican en tres formas: en carrete (figuras I.4. a y b), en silleta (figura I.4 c), y en espada (figura I.4. d).

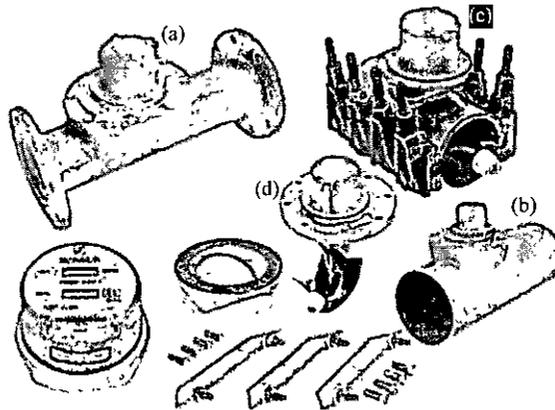


Figura I.4.- Medidores tipo propela: (a) carrete bridado, (b) carrete con extremos lisos, (c) silleta, (d) espada con cabeza bridada

Para asegurar una correcta instalación, los medidores tipo propela tienen una flecha grabada en el cuerpo del medidor que indica el sentido del flujo.

La instalación de los medidores en carrete no requieren de un especial cuidado; sin embargo, en el caso de los de silleta y de espada se debe medir cuidadosamente el espesor de la pared del tubo o su diámetro interior y exterior, ya que cuando la propela queda fuera del área que corresponde a la velocidad media dentro de la tubería, se pueden tener errores mayores al 5%. En todo caso, se debe preguntar al fabricante si el medidor tiene algún factor de corrección por el espesor del tubo

Los medidores de propela se pueden instalar en tuberías horizontales, verticales o inclinadas, sin embargo, la tubería siempre debe trabajar a tubo lleno (a presión), y debe instalarse en secciones rectas de tubería donde cualquier accesorio debe estar alejado una distancia igual o mayor a lo indicado en la figura I.5.

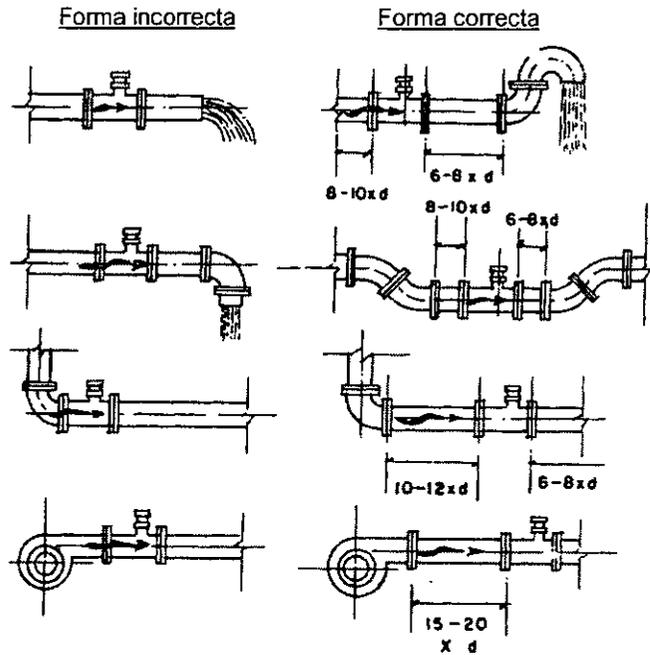


Figura I.5.- Forma de instalación de medidores de propela

En el tren de descarga del pozo y para la instalación del medidor, es recomendable construir un Bypass, para dar mantenimiento al filtro o al medidor sin que sea necesario interrumpir el bombeo. Ver figura I.6.

Las características estándar de los medidores de propela, para los diámetros más comunes, se muestran en el cuadro I.2 y I.3

Cuadro I.2.- Características estándar de medidores de propela

Tamaño del medidor		Q de operación. continua		q máx. intermitente		Pérdida máx. de carga	
mm	pulg	m^3/h	gpm	m^3/h	gpm	m.c.a.	lb/pulg
75	3	9.1 - 54.5	40 - 240	79.5	350	4.9	7
100	4	13.6 - 90.8	60 - 400	143.1	630	4.9	7
150	6	22.7 - 204.4	100 - 900	317.9	1400	3.5	5
200	8	27.3 - 272.5	120 - 1200	545.0	2400	3.5	5
250	10	36.3 - 363.4	160 - 1600	863.0	3800	3.5	5
300	12	45.4 - 454.2	200 - 2000	1135.5	5000	3.5	5

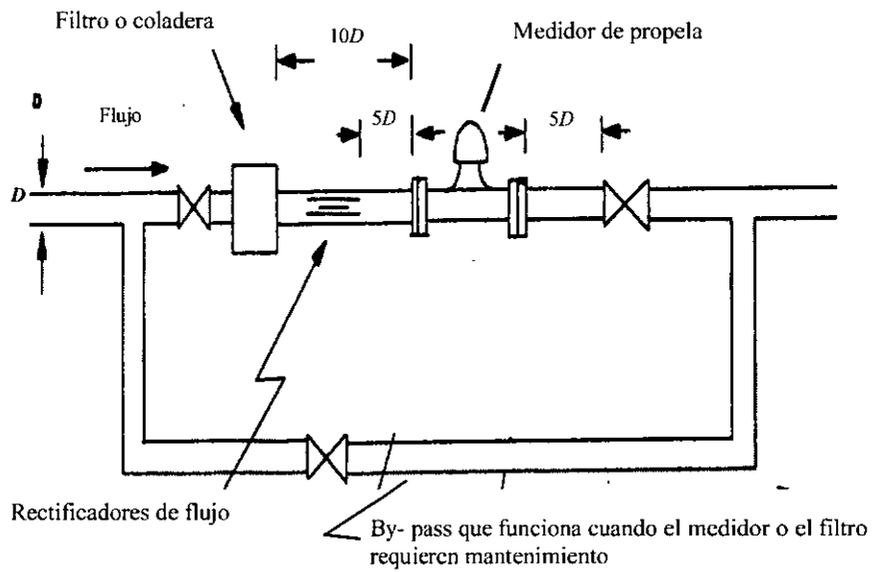


Figura I.6.- Esquema en planta para la instalación de un medidor de propela en la descarga de un pozo

Cuadro I.3.- Características físicas estándar de medidores de propela

Tamaño del medidor		Longitud entrada-salida†		Peso‡	
mm	pulg	mm	pulg	kg	lb
Medidores con bridas					
75	3	254.0 ±1.52	10.0 ±0.6	13.6 - 20.4	30 - 45
100	4	304.9 ±1.52	12.0 ±0.6	20.4 - 38.6	45 - 85
150	6	355.6 ±1.52	14.0 ±0.6	36.2 - 95.3	80 - 210
200	8	457.2 ±2.29	18.0 ±0.9	65.8 - 127.0	145 - 280
250	10	635.0 ±2.29	25.0 ±0.9	113.4 - 238.1	250 - 525
300	12	762.0 ±2.29	30.0 ±0.9	181.4 - 317.5	400 - 700

Cuadro I.3 (continuación).- Características físicas estándar de medidores de propela

Tamaño del medidor		Longitud entrada-salida†		Peso‡	
mm	pulg	mm	pulg	kg	lb
Medidores roscados					
25	1	48.3	1.9	0.64	1.4
38	1½	73.7	2.9	1.36	3.0
50	2	99.1	3.9	2.72	6.0

† Esta longitud es para medidores que no tienen rectificador de flujo en el mismo cuerpo.

‡ Para los medidores con bridas, el peso depende de la clase ANSI: 150, 300 o 600. En estas columnas se indica el peso para la clase 150 y 600.

Para determinar el tamaño más apropiado del medidor de propela, se requiere conocer en forma aproximada el gasto de operación continua, q_{normal} y el gasto máximo que se podría presentar en forma intermitente, $q_{nominal}$; esto se puede determinar a partir de aforos realizados con métodos aproximados.

Con estos datos se entra al cuadro I.2 y se determina el tamaño adecuado del medidor.

Recuérdese que no importa si no coincide el diámetro de la tubería con el diámetro del medidor, ya que se pueden emplear las reducciones que sean necesarias, para ajustar los diámetros entre la tubería y el medidor.

MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO

Los medidores electromagnéticos operan con base en la Ley de Faraday, que establece: "*el voltaje inducido en un conductor que se desplaza a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor*".

Constan de dos bobinas conectadas a dos electrodos; ambos elementos están montados, en planos perpendiculares entre si, en un cuerpo semejante al de un tubo en carrete (con bridas), con su eje paralelo a la dirección del flujo.

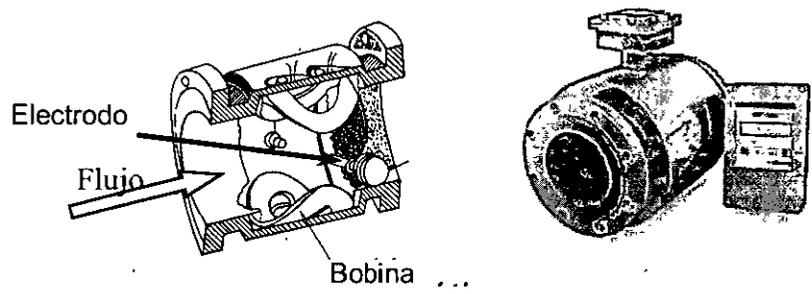


Figura I.7.- Componentes del medidor electromagnético

Al pasar una corriente a través de las bobinas, estas producen un campo magnético que es inducido hacia el interior del tubo, y al circular el agua corta el campo magnético y genera un voltaje que es registrado por los electrodos; estos electrodos transmiten la señal recibida a un microprocesador electrónico, que transforma el voltaje en caudal y volumen.

El cuerpo de estos medidores es de acero inoxidable o de aluminio recubierto con neopreno, plástico, teflón, cerámica u otros materiales que son aislantes de la corriente eléctrica.

Los medidores electromagnéticos se fabrican en dos tipos: carrete (figura I.7), e inserción (figura I.8).

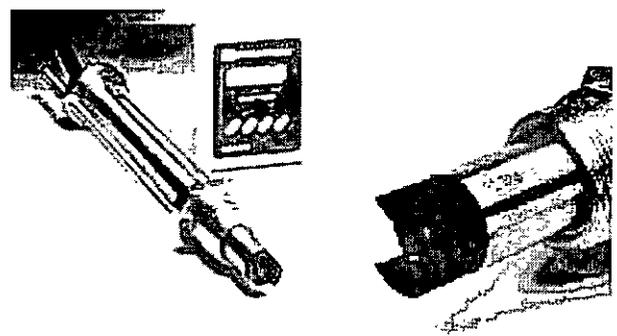


Figura I.8.- Medidor electromagnético de inserción y detalle de la punta

De acuerdo con su tamaño y tipo (de 0.5 a 24 pulgadas en carrete y de 1½ a 120 pulgadas cuando es de inserción), pueden medir velocidades de 0.015 hasta 10.0 m/s.

Los medidores electromagnéticos miden el flujo en forma bidireccional; si el flujo cambia de dirección, siguen midiendo.

Estos medidores se pueden instalar en tuberías horizontales, verticales o inclinadas, pero la tubería siempre debe trabajar a tubo lleno (a presión), y el eje de los electrodos debe estar horizontal.

El medidor debe instalarse en secciones rectas de tubería. Cualquier accesorio debe estar alejado, **como mínimo**, una distancia mayor a 5 diámetros aguas arriba y mayor a 3 diámetros aguas abajo del medidor, *para el tipo carrete* y de 10 a 24 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo para el tipo inserción.

Para la instalación del medidor, es recomendable construir un *by-pass* en el tren de descarga del pozo, con válvulas de seccionamiento, para dar mantenimiento al medidor sin que sea necesario interrumpir el bombeo. Instalaciones típicas para el tipo carrete en la figura I.9.

Estos medidores deben tener *siempre* una conexión a tierra para lograr un óptimo funcionamiento. Ver la figura I.10.

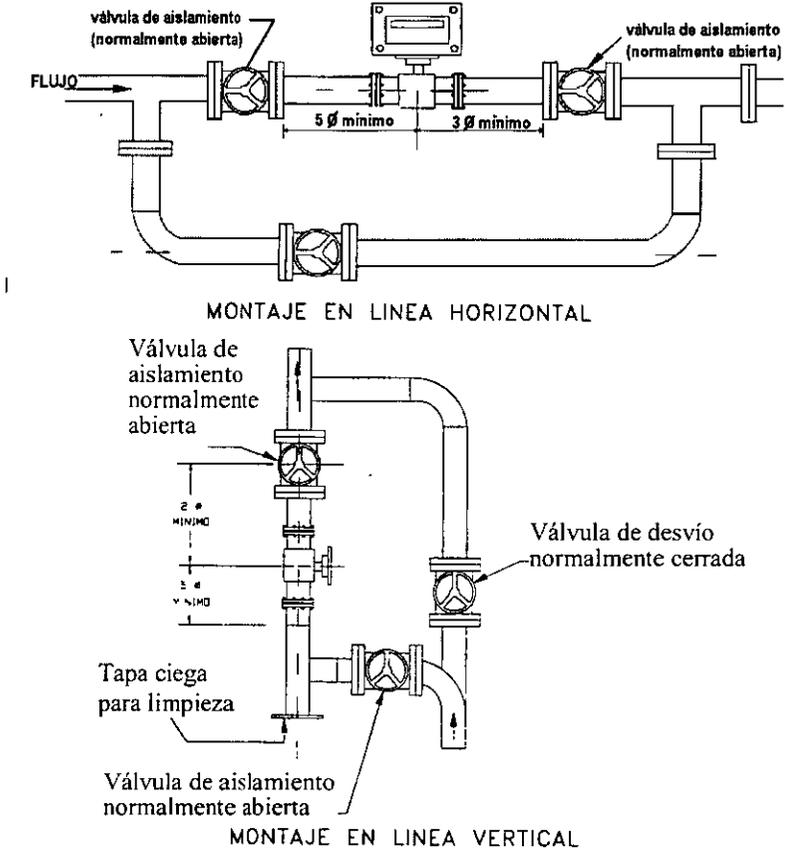


Figura I.9.- Localización de medidores electromagnéticos en carrete.

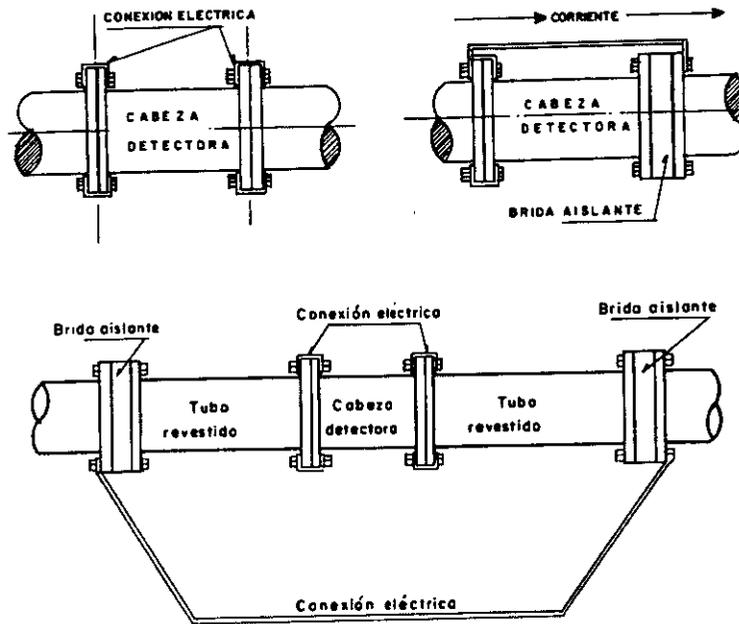


Figura I.10.- Instalación del medidor electromagnético tipo carrete.

Cuadro I.4.- Características estándar de medidores electromagnéticos *en carrete*.

Tamaño del medidor		Q de operación. continua		$q_{\text{máx.}}.$ intermitente	
mm	pulg	m^3/h	gpm	m^3/h	gpm
75	3	40	176	80	352
100	4	60	264	120	528
150	6	150	661	300	1321
200	8	250	1101	500	2202
250	10	400	1761	800	3523
300	12	600	2642	1200	5284
350	14	800	3523	1600	7045

Cuadro I.5.- Características físicas estándar de medidores electromagnéticos *en carrete con bridas*.

Tamaño del medidor		Longitud entrada-salida		Peso	
mm	pulg	mm	pulg	kg	lb
75	3	200	7.9	18	40
100	4	250	9.8	24	54
150	6	300	11.8	38	84
200	8	350	13.8	37	81
250	10	450	17.7	60	132
300	12	500	19.7	70	154

Cuadro I.5.- Características físicas estándar de medidores electromagnéticos *en carrete roscado*

Tamaño del medidor		Longitud entrada-salida		Peso	
mm	pulg	mm	pulg	Kg	lb
13	½	119	4.7	2.5	5
19	¾	127	5	2.5	5
25	1.0	127	5	2.5	5

Cuadro I.6.- Características estándar de medidores electromagnéticos de *inserción* (o de punta), para tuberías de hasta 78 pulgadas.

Tamaño del medidor		Diám. máximo		Q de operación continua		Q máx. intermitente	
mm	pulg	mm	(pulg.)	m ³ /h	gpm	m ³ /h	gpm
457	18	550	(22)	2565	11294	7690	33861
711	28	1050	(42)	9350	41171	28055	123535
965	38	1500	(60)	19085	84038	57255	252113
1220	48	1950	(78)	32253	142021	96760	426067

El peso de los medidores de inserción puede variar de 3.5 a 5.5. kg (7.7 a 12.1 libras).

Para determinar el tamaño del medidor electromagnético en carrete, se procede como se indica para el medidor de propela.

Para el caso del medidor electromagnético de inserción, se deben tener los siguientes datos:

D Diámetro interno de la tubería.

e espesor de la pared de la tubería.

n longitud del niple junto con la válvula de inserción para insertar el medidor a la tubería.

b longitud de la brida de sujeción del aparato.

El tamaño, *M*, del medidor electromagnético de inserción, se determina al realizar la siguiente suma:

$$M = X + e + n + b$$

Donde:

X = *D*/8 si existen 15 o más diámetros de tubería recta y sin obstrucciones para instalar el aparato, en caso contrario,

$$X = D/2$$

e = 4.5 a 57.3 mm, para tuberías de polietileno de alta densidad.

e = 7 a 21 mm, para tuberías de hierro dúctil.

n = 3 a 5 pulgadas (76 a 127 mm)

b = 2.5 a 5.25 pulgadas (63 a 133 mm)

Para este tipo de medidor no importa el rango de gastos a medir, ya que el medidor registra la velocidad del flujo; el elemento secundario calcula el gasto conociendo el diámetro interno de la tubería.

ACCESORIOS ESPECIALES

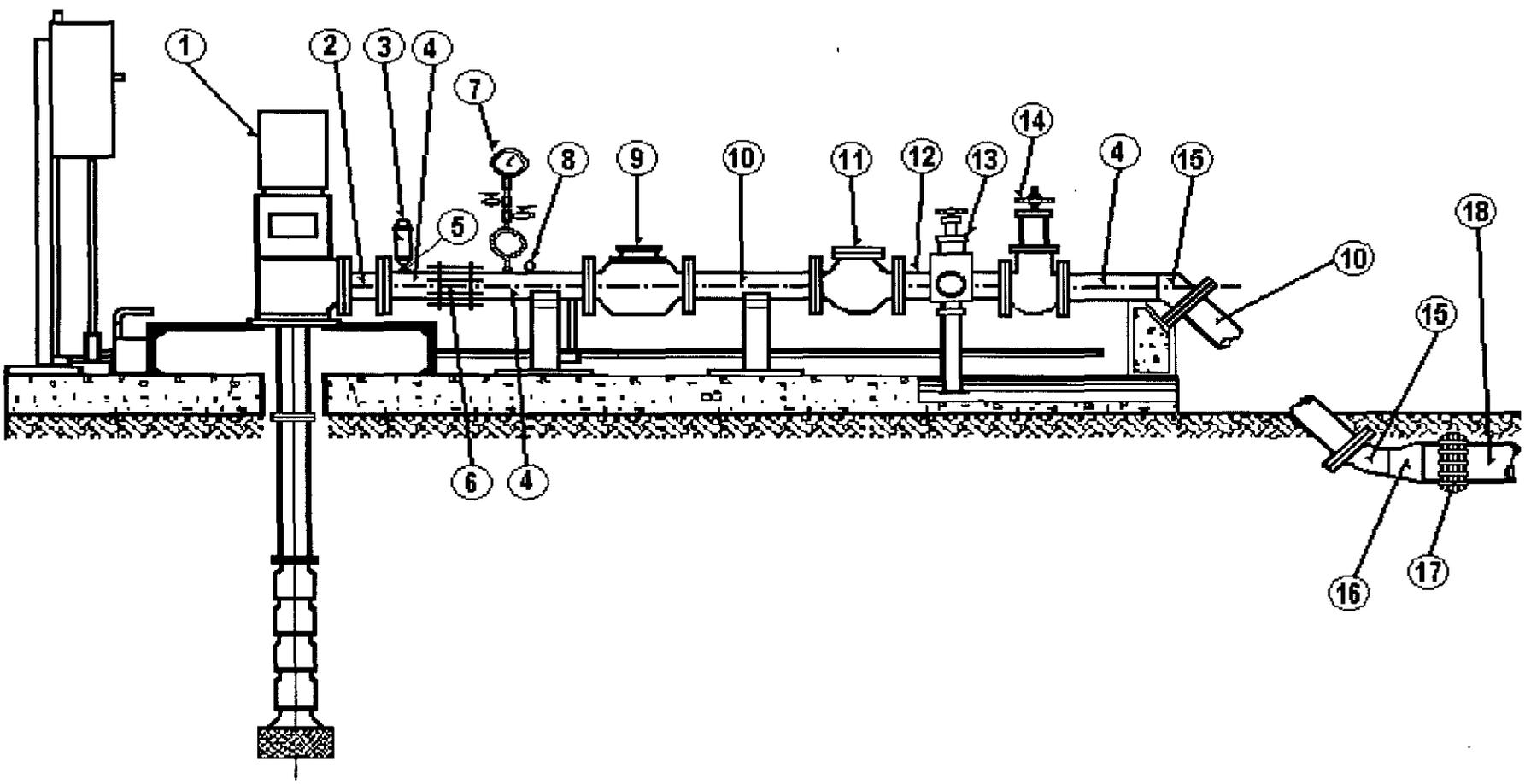
Para la instalación del medidor seleccionado existen accesorios especiales que sirven para:

- Acoplar las diferentes secciones de la descarga del pozo.
- Medir variables relacionadas con el funcionamiento del sistema de bombeo (presión y velocidad del flujo).
- Proteger las instalaciones cuando se presentan fallas en la operación (válvulas: *Check*, *a/e* de aire, *aliviadora* de presión).

En la figura I.17 se muestran los accesorios que conforman el llamado "*tren de descarga del pozo*", mismos que se mencionan a continuación:

1. Bomba vertical del pozo.
2. Cabezal de descarga o adaptador para descarga del pozo.
3. Válvula de admisión/expulsión (*a/e*) de aire.
4. Extremidad de FoFo o de acero al carbón cédula 40 con bridas soldables *slip-on*.
5. Cople soldable con rosca para instalar válvula *a/e* de aire.
6. Junta Dresser.
7. Manómetro *Bourdon*.
8. Válvula de inserción para tubo Pitot.
9. Medidor de caudal y totalizador (placa de orificio, propela o electromagnético).
10. Carrete de FoFo (o acero al carbón Céd. 40, bridas soldables).
11. Válvula de retención (válvula *Check*).
12. "T" con reducción.
13. Válvula aliviadora de presión.
14. Válvula de compuerta.
15. Codo 45° de acero al carbón cédula 40, brida soldable *slip-on*.
16. Reducción excéntrica, de acero al carbón cédula 40.
17. Junta *Gibault*.
18. Tubería de conducción a presión.

Figura 1.17.- Accesorios especiales del *trío de descarga* del pozo.



Tuberías y codos: hay de acero al carbón que resisten presiones de hasta 200 metros columna de agua (*mca*) y se pueden soldar. Son más ligeras que el hierro dúctil, pero son susceptibles de sufrir corrosión cuando no están pintadas en el interior y el exterior.

Extremidades y carretes: de hierro dúctil (Fierro Fundido, FoFo), no son soldables, tienen bridas para conectar a tuberías metálicas y sin bridas para tuberías no metálicas. Son más resistentes a la corrosión que las de acero al carbón.

Bridas de acero al carbón: son soldables y tienen diferentes espesores de acuerdo con la presión que van a resistir. Se debe revisar que, para la sujeción con tornillos, el número de orificios sea el mismo que el de las piezas que se van a conectar y que el diámetro interior sea el mismo que el diámetro exterior de la tubería donde se va a soldar.

Válvula de admisión/expulsión de aire (Va/e): sirve para expulsar el aire existente en la tubería de descarga cuando se inicia el llenado, o para permitir el acceso de aire a la tubería y romper el vacío que se forma en la columna de succión, después de haber detenido el bombeo, o cuando se va a vaciar la tubería de descarga.

Junta Dresser: se utiliza para conectar tuberías de acero con extremos lisos o extremidad y tubo y que permite realizar trabajos de montaje y desmontaje sin mover el resto de las instalaciones.

Manómetro Bourdon: sirve para medir la presión dinámica del flujo cuando la bomba está funcionando. El rango del manómetro debe ser bajo, de 0 - 1 o 2 kg/cm^2 , cuando la descarga es a la atmósfera y de 0 - 12 o 14 o 21 kg/cm^2 , cuando la descarga es a una tubería a presión: La carátula debe ser de 100 mm (4 pulg.), de diámetro y conexión de 13 mm ($\frac{1}{2}$ pulg.).

Válvula de inserción para tubo Pitot: se utiliza para instalar el tubo Pitot cuando se requiere llevar a cabo el aforo del pozo o verificar la calibración del medidor de gasto.

Válvula de retención (Check): sirve para evitar que la tubería de conducción (que trabaja a presión), descargue en dirección hacia el pozo; solo deja pasar el flujo en el sentido hacia la tubería de conducción.

Válvula aliviadora de presión: protege a las tuberías de descarga y de conducción amortigua la sobrepresión causada por un cierre rápido de la válvula de compuerta o por un paro repentino del motor de la bomba. Se utiliza solo cuando la descarga del pozo es a una tubería de conducción que trabaja a presión.

Válvula de compuerta: se emplea para aislar el flujo, ya sea antes y/o después del tren de descarga, para actividades de mantenimiento o reparación. Esta válvula trabaja totalmente abierta o totalmente cerrada, no se recomienda que trabaje parcialmente abierta para regular el caudal; en los casos que se requiera regular el caudal, se emplea la válvula de mariposa.

Reducción excéntrica: sirve para conectar los diámetros diferentes entre el tren de descarga y la tubería de conducción a presión. Es de cero al carbón cédula 40 sin costura. Se instala con soldadura.

Junta Gibault: se utiliza para unir tuberías de acero o de asbesto cemento con extremos lisos o extremidad y tubo; no permite holgura para realizar trabajos de montaje y desmontaje sin mover el resto de las instalaciones.

Empaques: sirven para sellar la unión entre bridas, se venden para resistir presiones de 10.5 kg/cm^2 y de 21.0 kg/cm^2 . Son de cara realzada, tipo anillo de asbesto comprimido, de 1.6 mm de espesor.

Espárragos: son tornillos para sujeción de bridas, deben ser de acero ASTM-A 193, grado B7, con dos tuercas hexagonales ASTM-A 194, clase 2H.

COLOCACIÓN

Para colocar el medidor de caudal en el tren de descarga, se deben atender las siguientes recomendaciones.

- ✓ Drenar las instalaciones antes de instalar el medidor o después de haber hecho alguna reparación aguas arriba.
- ✓ Limpiar cuidadosamente el medidor antes de instalar.
- ✓ No instalar en puntos altos de las líneas donde se pueden acumular bolsas de aire.
- ✓ No instalar medidores electromagnéticos cerca de líneas de alta tensión y revisar que tenga conexión a tierra.
- ✓ La tubería donde se instalará el medidor siempre debe trabajar a presión (tubo lleno).
- ✓ Cuidar que: las juntas de las bridas, las tomas de presión y otros elementos, no se proyecten hacia el interior de la tubería.
- ✓ Cuando se instala una válvula de inserción para tubo *Pitot*, se recomienda utilizar una silleta para su colocación. La distancia de tubería recta hacia aguas arriba de esta válvula debe ser mayor a 30 diámetros. Si se instalan aletas rectificadoras de flujo, la distancia se puede reducir hasta 9 diámetros.
- ✓ Verificar que el sentido del flujo sea el indicado en el medidor.
- ✓ Instalar una válvula *Check* (de retención), aguas abajo del medidor, (solo cuando la descarga es a una línea a presión).
- ✓ Revisar que las distancias a piezas y accesorios sean las recomendadas por el fabricante.
- ✓ Verificar que la carátula de lectura quede en posición horizontal, para medidores tipo propela.
- ✓ En las roscas de tuberías y medidores se deberá aplicar cinta sellante (a base de teflón).
- ✓ El filtro o coladera y el acondicionador de flujo (aletas para hacer uniforme el flujo), cuando se requieran, deberán colocarse aguas arriba del medidor.
- ✓ Los tornillos para unir bridas, se deberán apretar en forma alternada para evitar torceduras en estos elementos; especial cuidado se deberá tener con las bridas del medidor de placa de orificio.

PRUEBAS DE EXACTITUD

Las pruebas de exactitud se realizan para determinar los errores en tres condiciones de operación: caudal mínimo, caudal normal y caudal máximo.

El error, e , en el registro del volumen, que tiene un instrumento al medir un caudal (expresado en % del volumen medido), se calcula con la siguiente fórmula:

$$e = \frac{(Vol_{indicado} - Vol_{real})}{Vol_{real}} \times 100$$

Donde:

$Vol_{indicado}$, es el volumen indicado por el medidor, en *litros*.

Vol_{real} , es el volumen real que ha pasado por el medidor y que es recibido en un tanque debidamente calibrado, en *litros*.

Un signo negativo en el resultado de la fórmula, significa que el medidor registra un volumen menor que el real (pérdida para el organismo operador), y un signo positivo indica que está registrando un volumen mayor al real (pérdida para el usuario del servicio).

El procedimiento de prueba que se sigue es el que se indica a continuación. Solamente con tres caudales para determinar los errores correspondientes.

- 1.- Se instala el medidor en el banco de pruebas, se revisa que no haya fugas y se escribe la fecha, hora y datos del banco de pruebas en la hoja de control.
2. Se toman los datos del medidor (número de serie, marca, modelo, diámetro y caudal nominales).
3. Se establece un caudal cercano a 5% del caudal nominal del medidor (se usa un rotámetro).
4. Se cierra la válvula de paso hacia el medidor para detener el registro y se toma la lectura inicial, L_i , del volumen registrado en la carátula del medidor.
5. Se abre la válvula de paso hacia el medidor, al mismo tiempo se inicia el registro del tiempo con un cronómetro y se registra la presión antes y después del medidor, $P_{entrada}$ y P_{salida} .
6. Cuando el tanque de aforo (mide el volumen real, Vol_{real}), se haya llenado hasta el volumen indicado en el cuadro O.1, se cierra la válvula de paso hacia el medidor, para detener el registro y al mismo tiempo se detiene el cronómetro.
7. Se registra la lectura final, L_f , del medidor y el tiempo, T , medido con el cronómetro.
8. Con el mismo gasto establecido, se repite la secuencia desde el paso 4, hasta completar tres grupos de registros.

9. Se modifica el gasto para establecerlo sucesivamente a un caudal cercano a: 15%, 25%, 50% y 70%, del caudal nominal del medidor y se repite la secuencia desde el paso 4.
10. Después de completar todos los registros, se calcula el error y el caudal promedios de tres los registros obtenidos hasta el paso 8 y se hace lo mismo para el resto de caudales establecidos.
11. Este error promedio calculado se asocia al % del caudal nominal promedio establecido, para determinar un punto en la gráfica de *error vs % del caudal nominal*.
12. Por último, de acuerdo con su definición, la precisión es el máximo valor de los errores promedio obtenidos en el paso 10; separando el máximo error para el campo inferior de medición y para el campo superior. Estos valores se comparan con los valores admisibles por las normas vigentes.

Por ejemplo, en la norma oficial NOM-012-SCFI-1994 para medidores de propela, se acepta un error máximo de $\pm 5\%$ en el campo inferior y de $\pm 2\%$ para el campo superior.

El error total se puede determinar cuando se promedian los tres errores promedio obtenidos, bajo la suposición de que los tres caudales de prueba corresponden a los de una operación normal en campo.

Cuadro O1. Caudal y volumen para la prueba de precisión de medidores de propela. Norma C704 de la AWWA.

Tamaño		Campo Inferior				
<i>mm</i>	<i>pulg</i>	q_{\min}	m^3/h	<i>gpm</i>	Vol. litros	<i>gal</i>
75	3	7.94		35	380	100
100	4	10.22		45	380	100
125	5	15.89		70	760	200
150	6	19.30		85	1140	300
200	8	20.43		90	1140	300
250	10	24.98		110	1140	300
300	12	31.79		140	1520	400

Tamaño		Campo superior							
<i>mm</i>	<i>pulg</i>	q_{normal}		Vol.		q_{max}		Vol.	
		m^3/h	<i>gpm</i>	litros	<i>gal</i>	m^3/h	<i>gpm</i>	litros	<i>gal</i>
75	3	9.1	40	380	100	34.1	150	1140	300
100	4	11.4	50	380	100	45.4	200	1900	500
125	5	17.0	75	760	200	90.8	400	3800	1000
150	6	20.4	90	1140	300	113.6	500	3800	1000
200	8	22.7	100	1140	300	136.3	600	7600	2000

250	10	28.4	125	1140	300	204.4	900	11400	3000
300	12	34.1	150	1520	400	227.1	1000	19000	5000

MÉTODOS DE MEDICIÓN APROXIMADOS

Otros métodos de medición de caudales, que se pueden emplear en campo cuando se desea obtener un dato muy aproximado del caudal, pero tienen una exactitud menor que los medidores tratados en este manual, son los siguientes:

- ! Método Volumétrico
- ! Método de la Escuadra o California

!!!NOTA IMPORTANTE!!!

El aforo con descarga libre dará un caudal mayor que cuando la descarga se realiza a una tubería que trabaja a presión.

Método Volumétrico.

Consiste en dirigir el flujo que sale de la tubería de descarga hacia un recipiente que tiene marcado un nivel cuyo volumen se conoce con exactitud; en el mismo instante, con un cronómetro, se mide el tiempo de llenado del recipiente hasta el nivel marcado.

El recipiente debe tener una capacidad tal que el tiempo de llenado sea mayor a 20 segundos.

Ejemplo 6:

Si se estima que se va medir un caudal cercano a 3.0 *litros/segundo*; entonces, el recipiente debe tener una capacidad de:

$$\text{Vol}_{\text{recipiente}} = 3.0 \text{ l/seg} \times 20 \text{ seg} = 60 \text{ litros como mínimo.}$$

En campo se puede utilizar un barril de 200 litros, en cuyo caso el tiempo aproximado de llenado, T, sería de:

$$T = (200 \text{ litros}) \div (3.0 \text{ l/seg.}) = 67 \text{ seg.}$$

Método de la Escuadra o California.

Consiste en medir la distancia horizontal, *L*, desde el borde de la tubería de descarga del flujo hasta el punto donde cae la superficie superior del chorro, y la altura, *Z*, al nivel del piso, desde el punto donde cae la misma superficie superior del chorro, hasta el eje de la tubería de descarga.

El caudal se obtiene con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{(0.02216AL)}{\sqrt{Z}}$$

Donde:

Q, es el caudal que descarga el equipo de bombeo, en *l/s*.

A, es el área de la sección transversal de la tubería de descarga, en *cm*².

L , es la distancia horizontal, entre el borde de la tubería de descarga y el punto donde cae el chorro, en cm .

Z , es la altura medida desde el nivel del piso donde cae el chorro y el eje de la tubería, en cm .

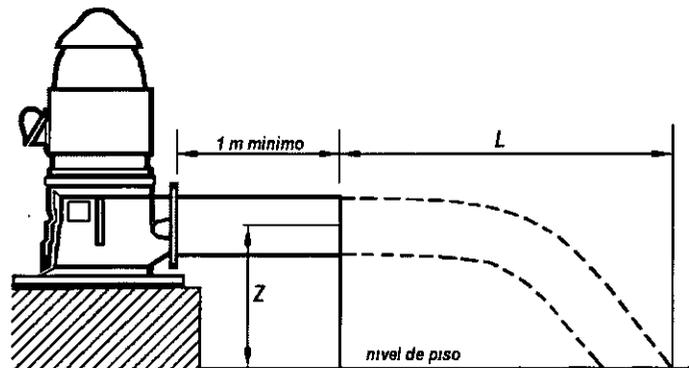


Figura O.1. Método de medición del caudal con escuadra

NOTA: es una condición importante que el eje de la tubería de descarga debe estar completamente horizontal.

Otro método de la escuadra

Consiste en medir la distancia horizontal, X , desde el borde del tubo de descarga, hasta un punto del chorro que está a una distancia vertical de 305 mm (un pie), medida desde la horizontal alineada con la clave de la tubería de descarga.

El caudal se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q = 0.0039AX$$

Donde: Q es el caudal, en l/s , A es el área de la sección transversal de la tubería, en cm^2 , y X es la distancia horizontal medida, en cm .

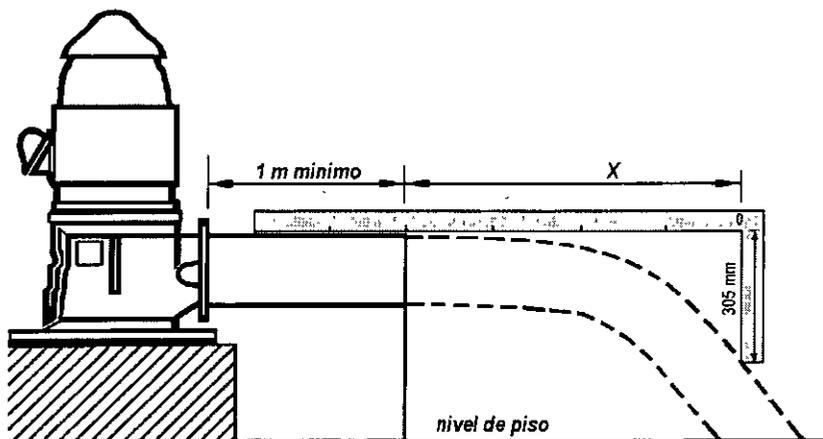


Figura O.2. Método de medición del caudal con escuadra a

MANTENIMIENTO.

Comprende todas las actividades que permiten lograr que el equipo de medición cumpla con la función de obtener mediciones confiables para los fines de control y buen aprovechamiento del volumen de agua que es extraído de la fuente.

M.1. DESINSTALACIÓN Y TRANSPORTE.

Antes de desinstalar cualquier medidor, se deberá parar la bomba; o bien, si el tren de descarga tiene un *by-pass* para no interrumpir el bombeo, se deberá desviar el caudal, de acuerdo con lo que se indica a continuación.

Desvío del caudal hacia el *by-pass*.

- 1.- En bitácora dibujar un croquis del tren de descarga e identificar con un número cada válvula, anotando su número de serie, diámetro, tipo y marca.
- 2.- Anotar la fecha, la hora y la lectura del totalizador.
- 3.- Abrir la válvula en el *by-pass* que queda aguas abajo y anotar el número de vueltas que se le dé al volante de la válvula desde la posición totalmente cerrada hasta totalmente abierta.
- 4.- Abrir, MUY LENTAMENTE, la válvula que queda aguas arriba en el *by-pass* y anotar el número de vueltas que se le dé al volante de la válvula desde la posición totalmente cerrada hasta totalmente abierta.
- 5.- Cerrar, LENTAMENTE, la válvula que queda aguas abajo del medidor y anotar el número de vueltas que se le dé al volante de la válvula desde la posición totalmente abierta hasta totalmente cerrada.
- 6.- Cerrar, LENTAMENTE, la válvula que queda aguas arriba del medidor y anotar el número de vueltas que se le dé al volante de la válvula desde la posición totalmente abierta hasta totalmente cerrada.

Paro del equipo de bombeo.

Cuando no hay *by-pass*, se deberá detener el funcionamiento del equipo de bombeo, siguiendo la secuencia proporcionada por el fabricante de la bomba. En caso de que no exista un manual de operación para esto, a continuación se proporciona un procedimiento.

- 1.- Verificar que el tren de descarga tenga válvula aliviadora de presión (número 13 en la figura I.17), y que los atraques estén en buenas condiciones.
- 2.- Oprimir el botón de "*paro*" en la consola de control del arrancador y observar que el equipo pare suavemente.
- 3.- Observar que el golpe de ariete no cause desplazamientos en el tren de descarga. Si esto ocurre, se deberá reportar a la unidad de mantenimiento esta irregularidad para su corrección.
- 4.- Anotar la fecha, la hora y la lectura del medidor.

5.- Anotar en la bitácora cualquier otra acción realizada o cualquier irregularidad detectada.

Después de haber aislado el medidor con las acciones de desvío o de paro del equipo de bombeo, se procederá a la desinstalación del medidor, como se indica a continuación.

Desinstalación de la Placa de orificio.

1.- Aflojar los tornillos de la brida donde se encuentra alojada la placa de orificio, en forma alternada para no torcer la placa.

2.- La mayoría de los fabricantes construyen la brida con un "*tornillo de extracción*", que generalmente tiene cabeza cuadrada; cuando se atornilla se separan las bridas y entonces se puede retirar la placa de orificio.

3.- Coloque una tapa ciega en la brida para evitar que se introduzcan objetos extraños en la tubería.

Desinstalación del Medidor de Propela.

1.- Colocar un caballete para soportar el medidor, si es tipo carrete.

2.- Dependiendo del modelo de medidor (en carrete, en silleta o en espada), aflojar los tornillos de las bridas o de la placa que sirve de base a la cabeza del medidor.

3.- Para los medidores en carrete, ajustar ligeramente las cadenas del caballete para soportar el medidor.

4.- Aflojar y quitar los tornillos de las bridas y retirar el medidor.

5.- Coloque una tapa ciega en la brida aguas arriba para evitar que se introduzcan objetos extraños en la tubería.

Desinstalación del Medidor Electromagnético.

1.- Apagar el interruptor del suministro de energía eléctrica hacia el medidor y retirar las conexiones de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

2.- Colocar un caballete para soportar el medidor, si es tipo carrete.

3.- Dependiendo del modelo de medidor (en carrete, en silleta o en espada), aflojar los tornillos de las bridas o de la placa que sirve de base al tubo de inserción del medidor.

4.- Para los medidores en carrete, ajustar ligeramente las cadenas del caballete, con el fin de soportar el medidor, aflojar y quitar los tornillos de las bridas y retirar el medidor. Coloque una tapa ciega en la brida aguas arriba para evitar que se introduzcan objetos extraños en la tubería.

5.- Para los medidores de inserción, retirar el tubo de inserción, cerrar la válvula de inserción y retirar el medidor. **NUNCA RETIRE EL MEDIDOR ANTES DE ESTAR SEGURO QUE LA VÁLVULA DE INSERCIÓN ESTÁ BIEN CERRADA.**

Transporte.

Para el transporte de los medidores tipo carrito se deberá tener cuidado de sujetarlos por las argollas que, para este fin están situadas en la clave del cuerpo, cerca de las bridas; en el transporte se deberán colocar caballetes para recibir el medidor apoyado por las bridas y se deberá asegurar de forma que no se mueva.

LIMPIEZA.

- ✓ Los medidores se deberán limpiar en el taller de medidores.
- ✓ No se deberán emplear solventes.
- ✓ No se deberá golpear ningún elemento del medidor.
- ✓ Se deberán emplear las herramientas apropiadas para desarmar y limpiar el medidor.
- ✓ Cuando sea necesario, se podrá utilizar lija fina, para retirar incrustaciones de minerales solidificados en las caras de la placa de orificio, pero se debe tener cuidado de no tocar los bordes del orificio biselado.

REVISIÓN.

Además de revisar el medidor, también se deberán revisar las condiciones de instalación del medidor, por lo que se recomienda revisar lo siguiente:

- ✓ Que las válvulas de seccionamiento estén totalmente abiertas.
- ✓ Que las tuberías no tengan incrustaciones de sales minerales en el interior.
- ✓ Que no haya aire atrapado en las tuberías.
- ✓ Que las terminales de conexiones eléctricas tengan buen contacto.
- ✓ Que la fuente de poder tenga el voltaje adecuado.

La revisión que se debe realizar a los medidores después de la desinstalación, consiste en:

- ✓ Buscar fugas en el cuerpo del medidor.
- ✓ Observar si existen torceduras o golpes en cualquier parte del medidor.
- ✓ Observar si faltan tornillos o si están dañados.
- ✓ Observar el estado de los empaques de las bridas.
- ✓ Evaluar el estado de la pintura e integridad de las tuberías que forman el tren de descarga (que no estén oxidadas).
- ✓ Verificar que la cara aguas arriba y el bisel del orificio, en los medidores de placa, esté bien liso y sin marcas.
- ✓ Revisar que los conductos de las tomas de presión no estén obstruidos.
- ✓ Revisar si el eje de la propela está torcida o si sus apoyos presentan desgaste.

- ✓ Revisar si existen depósitos de sedimentos en el cuerpo del medidor o en los electrodos de medidores electromagnéticos.
- ✓ Revisar si las mangueras y/o cables presentan raspaduras o daños externos.

REPARACIÓN.

Las actividades de reparación pueden ser de diversa índole, desde una simple limpieza hasta la rectificación de piezas o su reemplazo.

A continuación se dan algunas recomendaciones generales:

Verificar que no se excedan los límites de tolerancia para los siguientes aspectos:

- ✓ Desgaste.
- ✓ Torceduras de ejes o superficies.
- ✓ Acabado de las superficies de elementos primarios, y
- ✓ Exactitud.

En caso de que alguna tolerancia se encuentre fuera de los límites permisibles, se deberá corregir, cuando sea factible, o reemplazarla.

Los elementos que son de bajo costo se deben reemplazar, como son: empaques, juntas, estoperos, seguros y filtros.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

El mantenimiento preventivo es el que se realiza para evitar posibles fallas en el funcionamiento o en la integridad del equipo de medición o de las instalaciones y accesorios especiales.

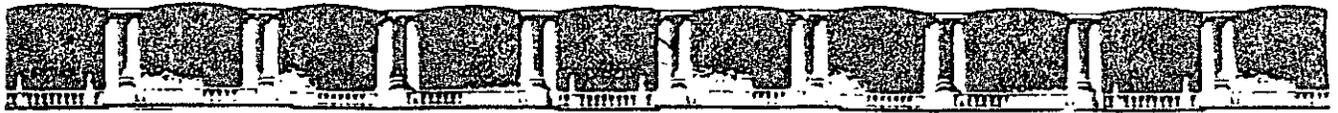
Para ello, se han definido periodos de revisión y verificación.

- ✓ Cada 3 meses, revisión en campo de la exactitud, con equipo portátil.
- ✓ Cada año, desinstalación para revisión general y limpieza.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO.

El mantenimiento correctivo es el que se realiza cuando se han detectado fallas en el funcionamiento o en la integridad del equipo de medición o en las instalaciones y accesorios especiales.

La corrección de fallas es muy costosa y debe evitarse, mediante la adecuada programación del mantenimiento preventivo.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**

PITOMETRÍA

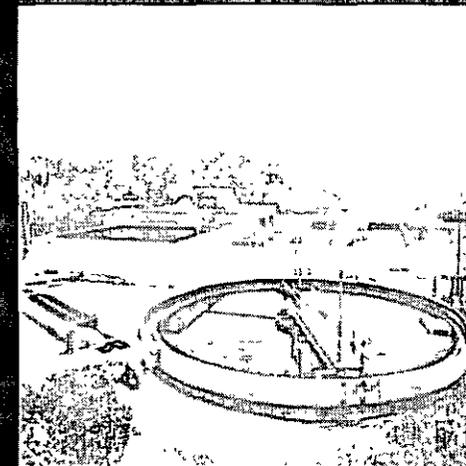
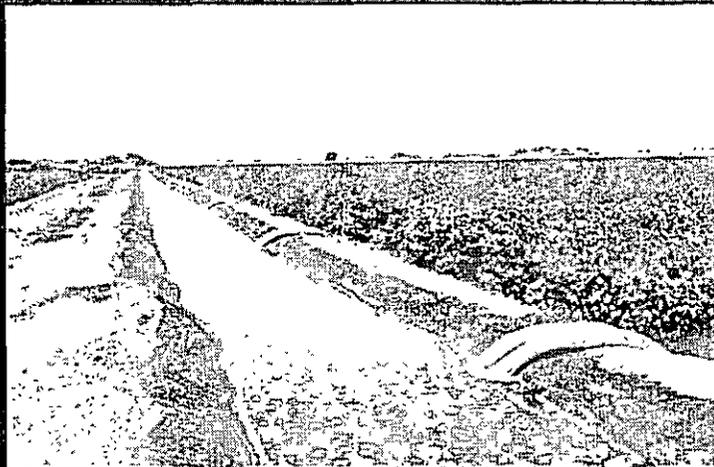
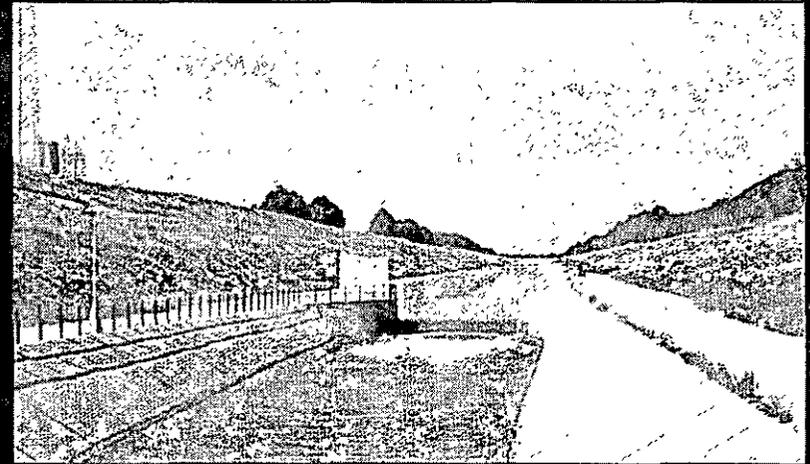
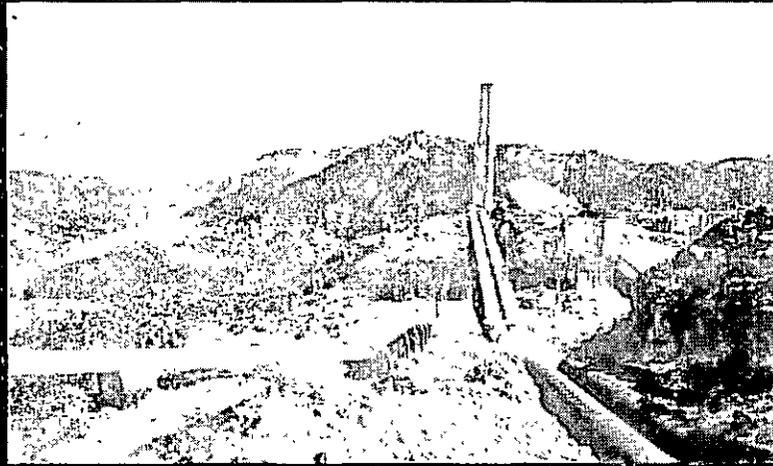
CA 426

**CONTROL DE PÉRDIDA Y
USO EFICIENTE DEL AGUA**

**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**



PITOMETRÍA PARA EL CONTROL DE PÉRDIDAS Y USO EFICIENTE DEL AGUA



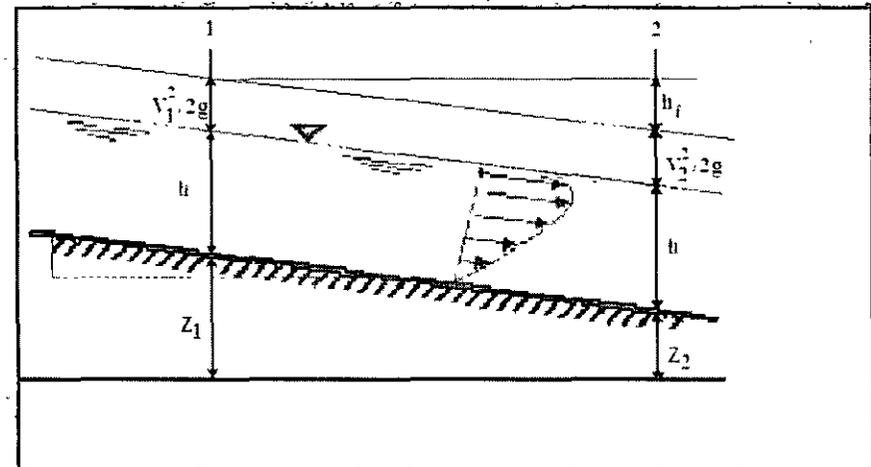
SERGIO ENRIQUÉZ ZAPATA

FLUJO EN CANALES A SUPERFICIE LIBRE

El flujo de en canales se caracteriza por la exposición de una superficie libre a la presión atmosférica.

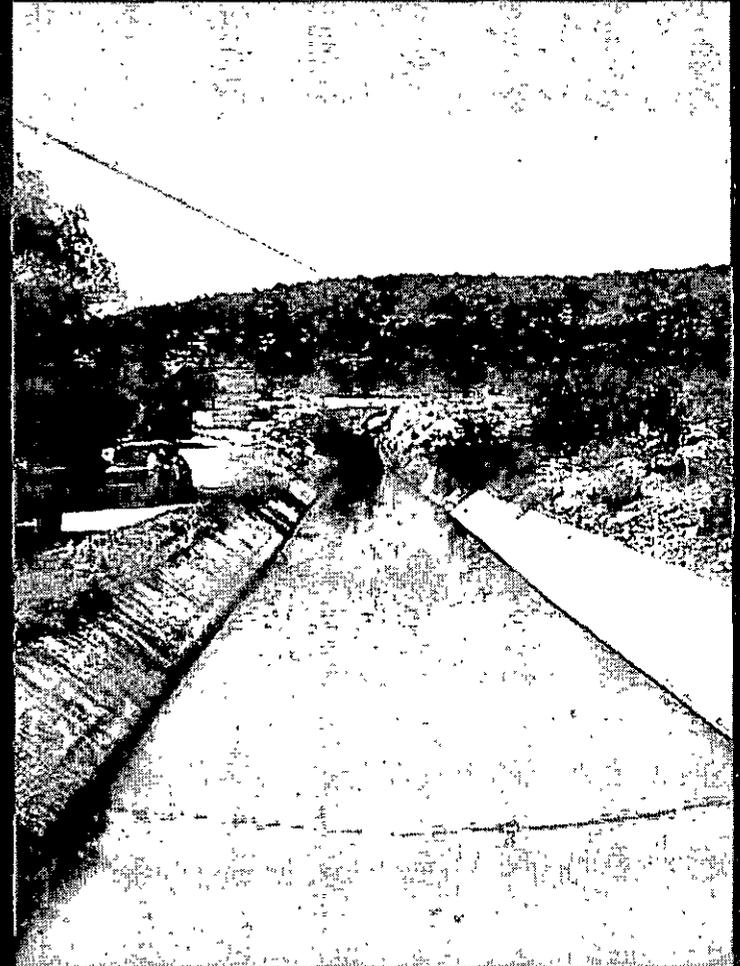
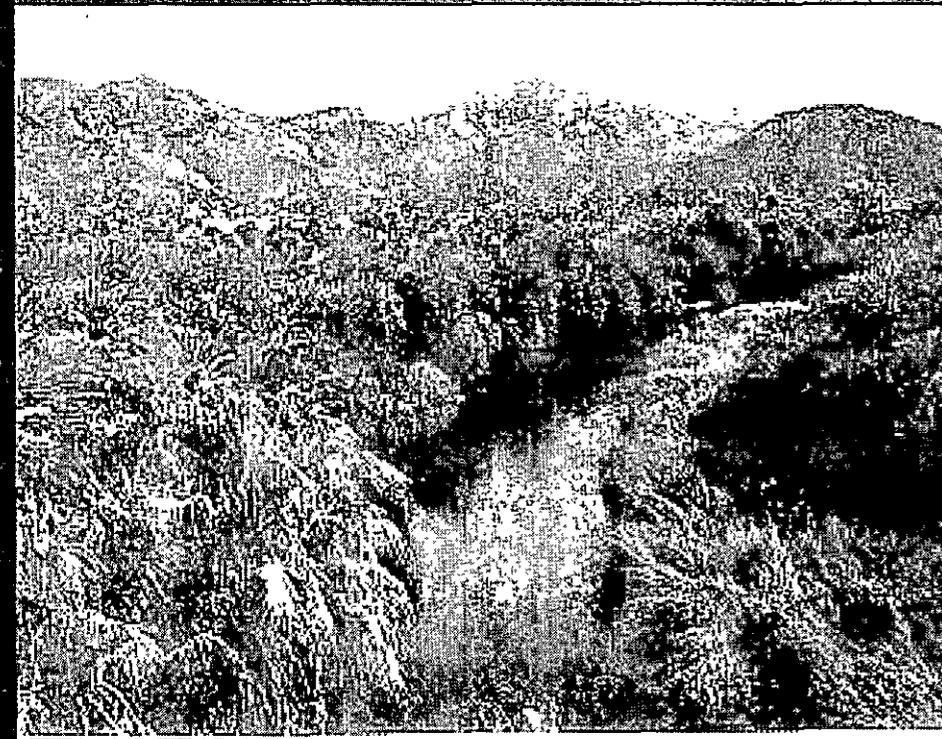
El flujo es más complejo que en conductos a presión.

El flujo se ve afectado por todas las fuerzas presentes en el flujo dentro de un tubo, más las fuerzas de gravedad y de tensión superficial por la superficie libre.



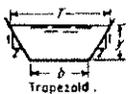
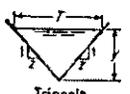
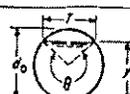
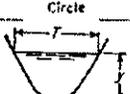
DE ACUERDO CON SU ORIGEN

Los canales pueden ser naturales o artificiales.



Un canal es prismático si

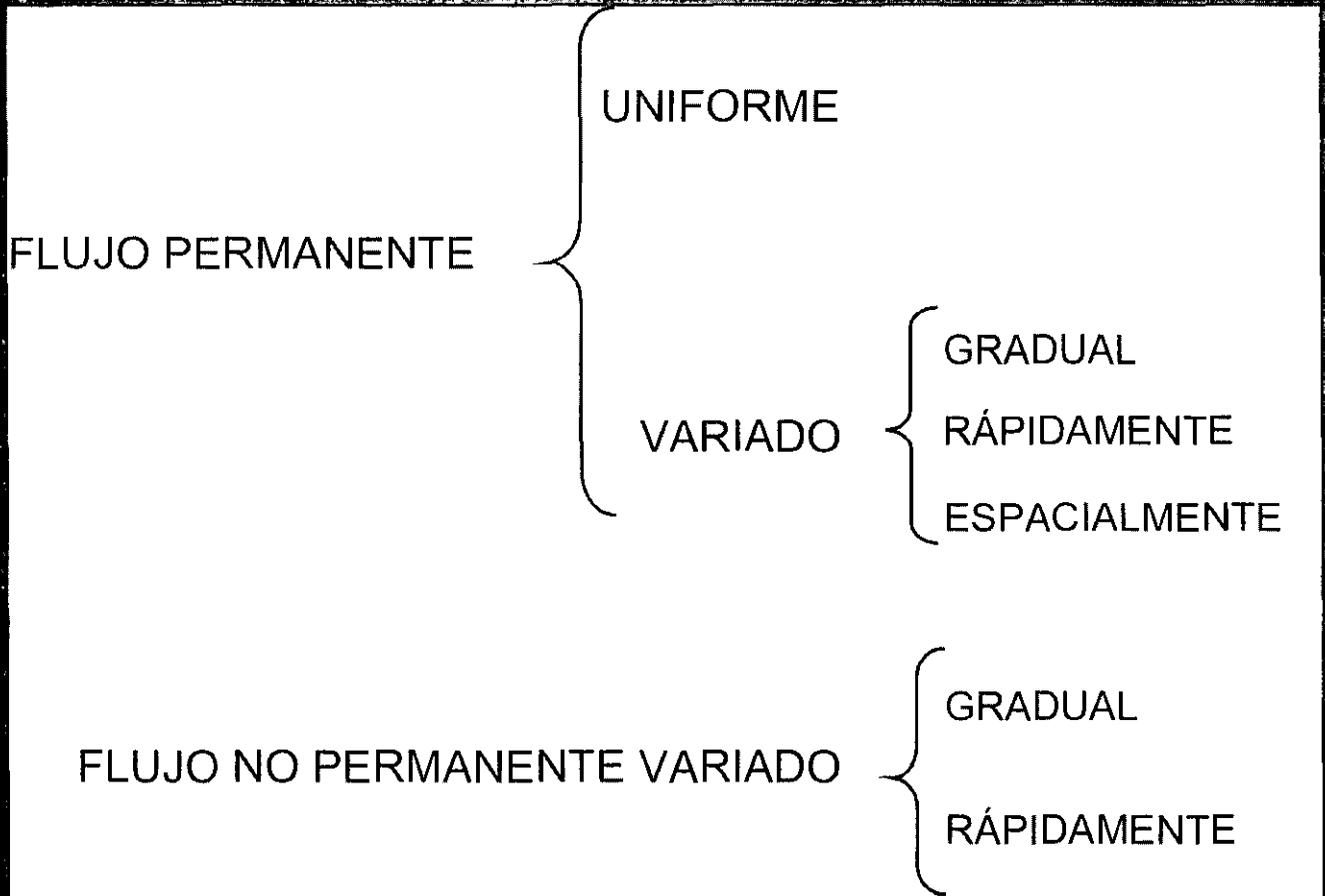
Su sección transversal y pendiente son invariables.

Section	Area A	Wetted perimeter P	Hydraulic radius R	Top width T	Hydraulic depth D	Section factor Z
 <p>Rectangle</p>	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	$by^{1.5}$
 <p>Trapezoid</p>	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
 <p>Triangle</p>	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{1.5}$
 <p>Circle</p>	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)d_0^2$	$\frac{1}{2}\theta d_0$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)d_0$	$\frac{(\sin \frac{1}{2}\theta)d_0}{2\sqrt{y(d_0 - y)}}$ or $\frac{(\sin \frac{1}{2}\theta)d_0}{2\sqrt{y(d_0 - y)}}$	$\frac{1}{4}\left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{1}{2}\theta}\right)d_0$	$\frac{\sqrt{2}}{32} \frac{(\theta - \sin \theta)^{1.5}}{(\sin \frac{1}{2}\theta)^{0.5}} d_0^{2.5}$
 <p>Parabola</p>	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$	$\frac{3}{8}y$	$\frac{3}{8}\sqrt{6}Ty^{1.5}$
 <p>Round-cornered rectangle ($y > r$)</p>	$\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y$	$(\pi - 2)r + b + 2y$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	$b + 2r$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2}{b + 2r} + y$	$\frac{[(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$
 <p>Round-bottomed triangle</p>	$\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$	$\frac{T}{z}\sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$	$\frac{A}{P}$	$2\{z(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}\}$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{T}}$

* Satisfactory approximation for the interval $0 < z \leq 1$, where $z = 4y/T$. When $z > 1$, use the exact expression $P = (T/2)[\sqrt{1 + z^2} + 1/z \ln(z + \sqrt{1 + z^2})]$.

Clasificación del flujo en canales

Bajo el supuesto de que en todos los casos el flujo es unidimensional.



Flujo en canales

El flujo uniforme difícilmente se logra.

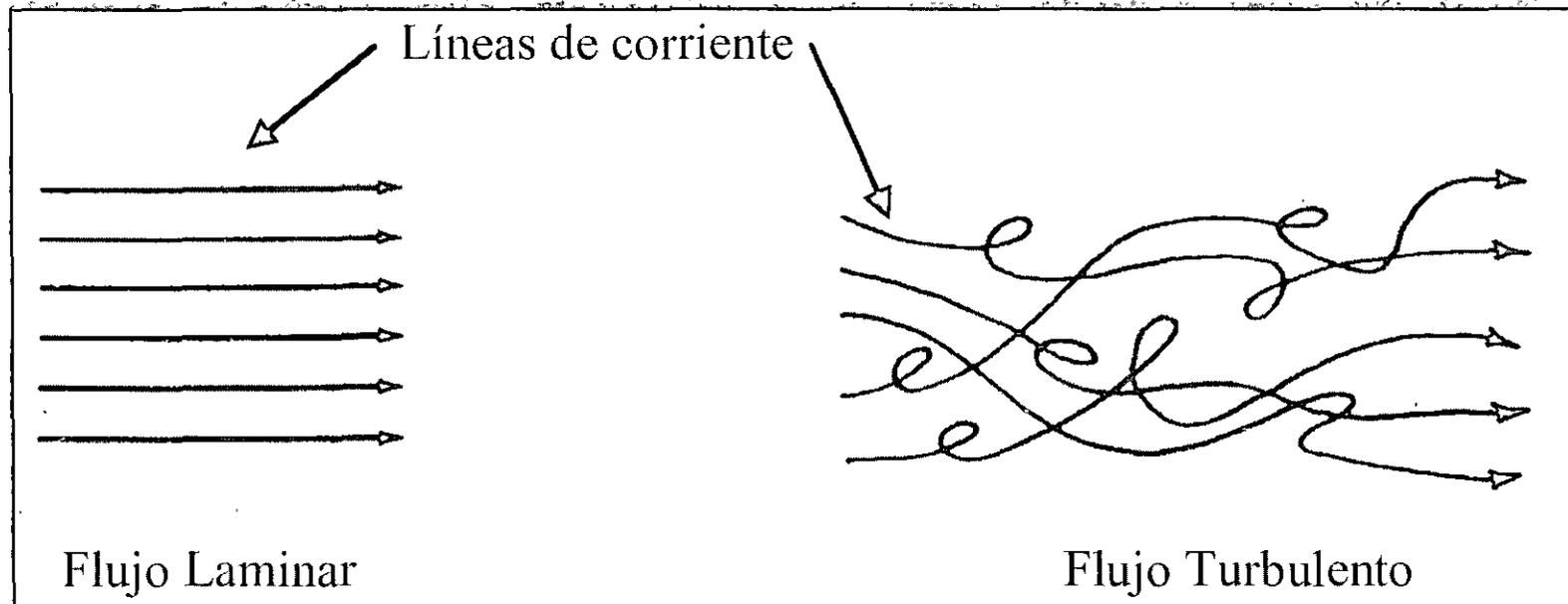
En canales rectos y largos de sección transversal y pendiente de plantilla constante, la suposición es razonable y simplifica el análisis.

Flujo variado:

- gradual,
- rápida (salto hidráulico)
- espacialmente variado (cambian las características hidráulicas a lo largo del canal).

Flujo laminar y turbulento

Flujo laminar o flujo puramente viscoso, es el que se desplaza en láminas o capas.



Flujo turbulento, es en el cual las componentes de la velocidad tienen fluctuaciones al azar.

Flujo laminar y turbulento

¿Qué determina si un flujo es laminar o turbulento?

La velocidad y la configuración o tamaño del conducto y

La importancia de la fuerza viscosa, que se mide con el número de Reynolds definido como:

$$R_e = \frac{V R_h}{\nu}$$

Flujo laminar

$$Re < 400 \text{ a } 600$$

Flujo de transición

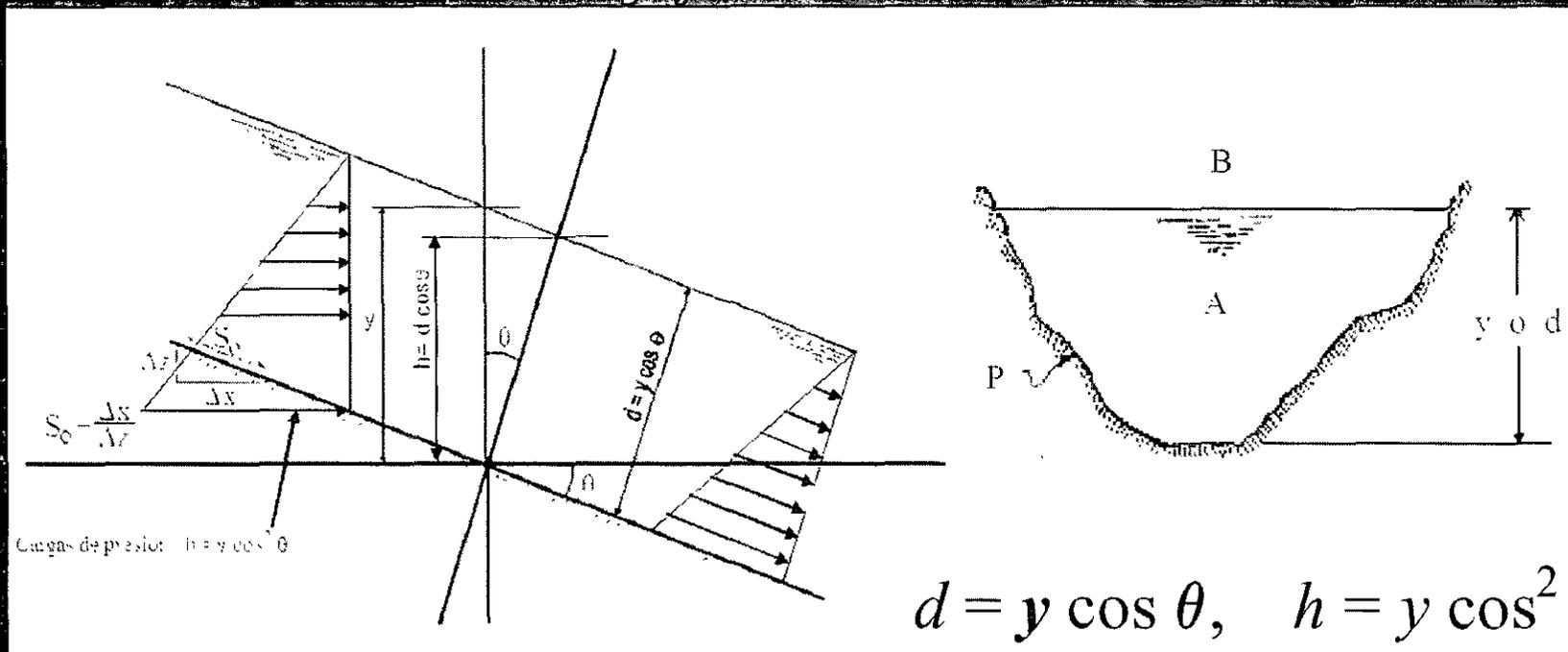
$$400 < Re < 2000$$

Flujo turbulento

$$Re > 2000$$

TIRANTE

Tirante normal: medido perpendicularmente a la dirección del flujo)



Tirante "y" es la distancia vertical del punto más bajo de la sección hasta la superficie libre.

Pendiente

Se considera grande cuando $\Delta z/\Delta x \geq 0.01$ o

cuando $\theta \geq 6^\circ$

Para canales con pendiente $\theta < 6^\circ$, el valor de $\cos \theta$ se aproxima a la unidad, por lo que se puede considerar que en estos casos el tirante vertical "y" es igual al tirante normal "d".

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

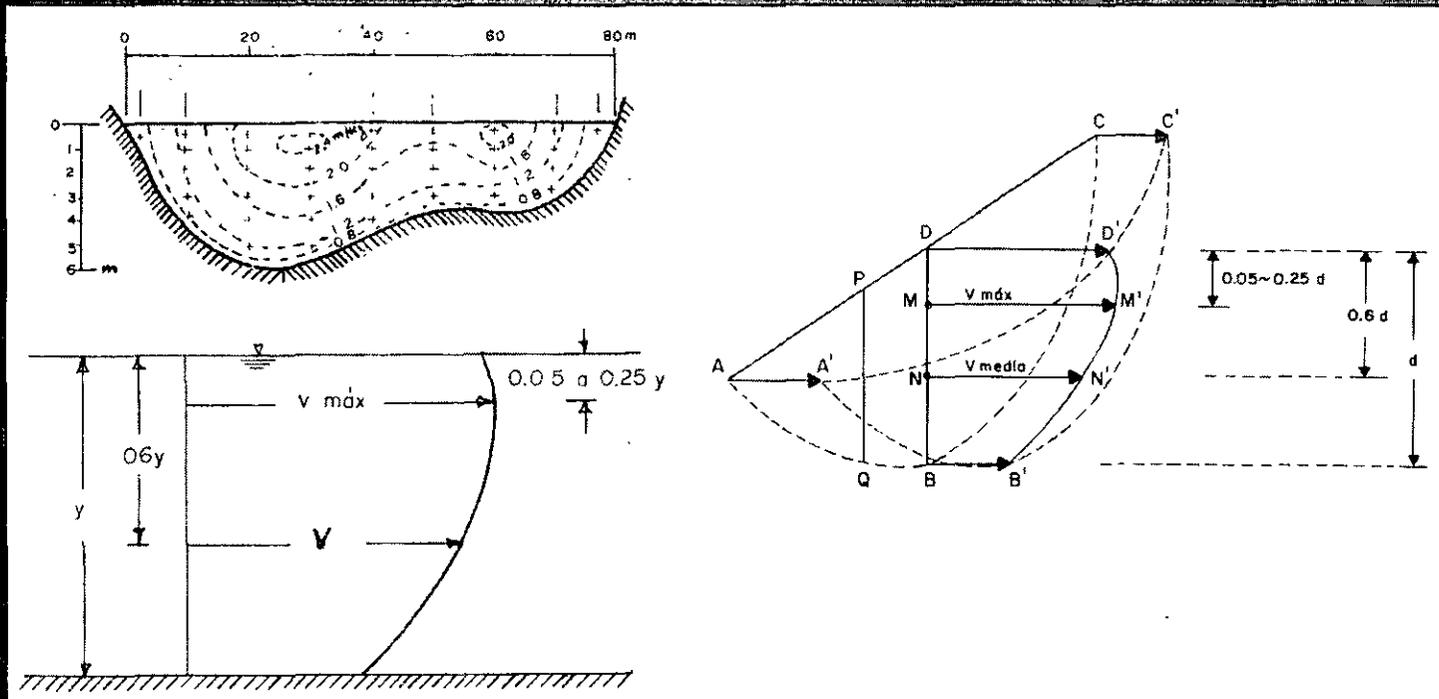
La velocidad en canales es afectada por la pendiente y por las resistencias pasivas, que resultan de:

- a) la naturaleza del lecho y eventual vegetación sumergida
- b) ensanchamientos y contracciones del cauce
- c) levantamiento o profundización del fondo
- d) curvas y otros cambios de dirección
- e) pilas de puente y otros obstáculos

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

En la sección de un canal, afecta la distribución de velocidades, la presencia de:

- la superficie libre del agua
- las curvas a lo largo del canal,
- la forma de la sección,
- la rugosidad superficial,
- el gasto y
- la acción de corrientes secundarias.



DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

La máxima velocidad se localiza prácticamente a 0.05 a 0.25 del tirante desde la superficie libre hacia abajo.

La velocidad media se localiza a 0.6 del tirante.

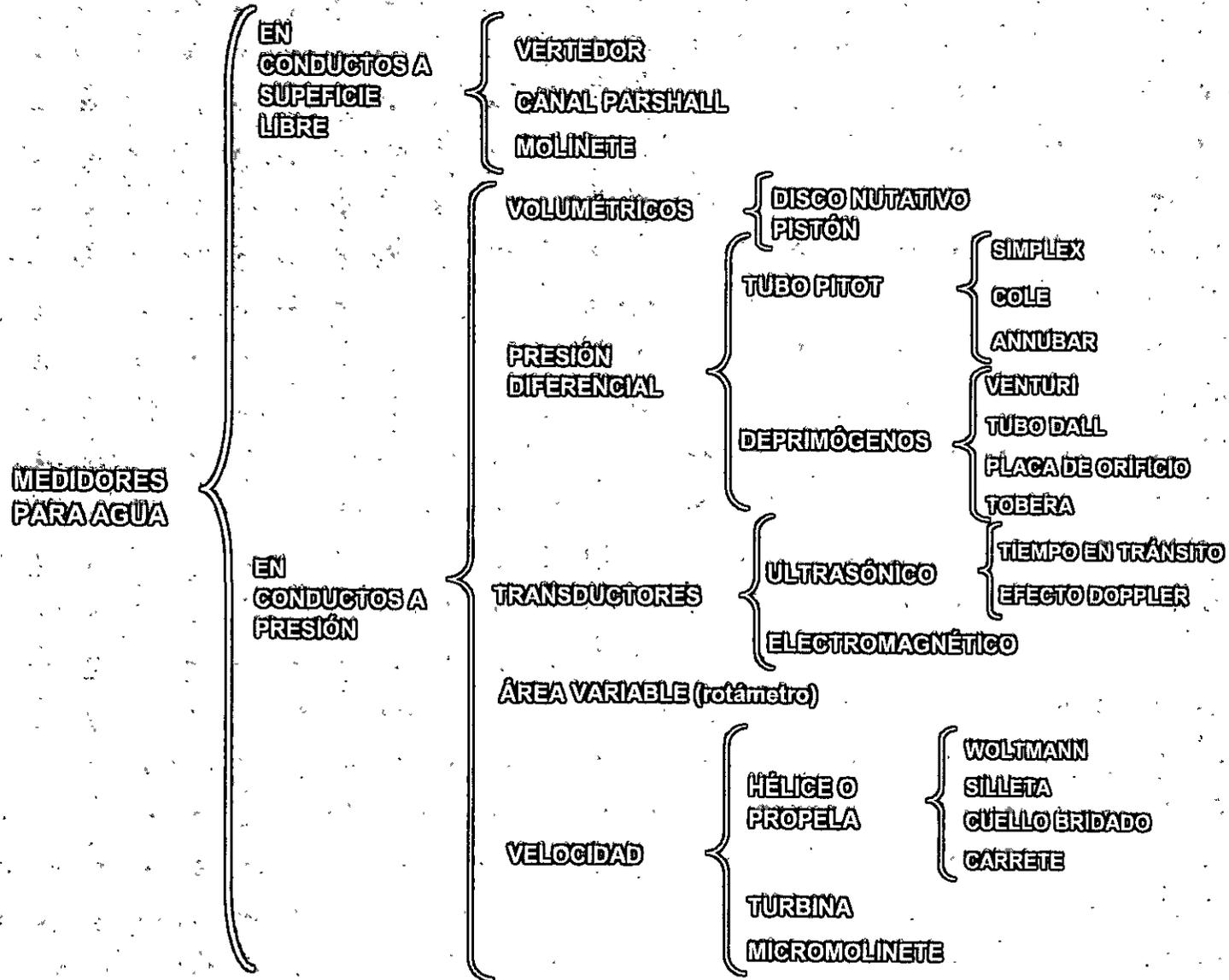
○ como el promedio de la velocidad a 0.2 y 0.8 del tirante

○ entre 0.8 y 0.94 de la velocidad superficial.

En un canal ancho, con gran velocidad y poco tirante o bien en un canal liso, la velocidad máxima se puede encontrar con frecuencia sobre la superficie libre del agua.

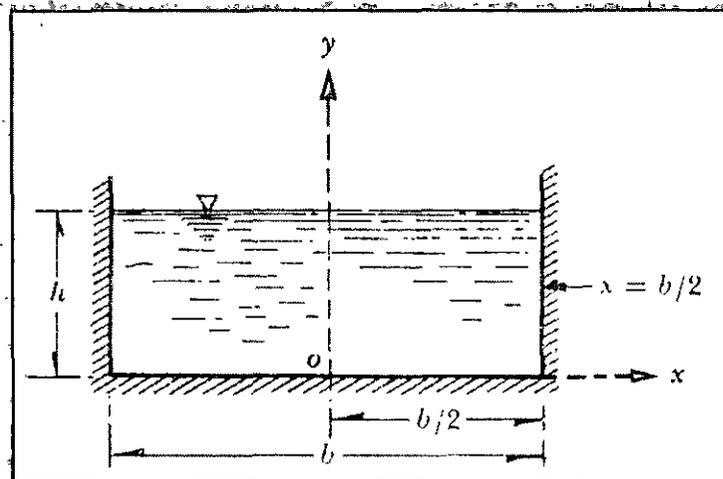
En un canal rectangular de ancho infinito, los bordos prácticamente no afectan al flujo y si el ancho del canal es mayor, de 4 a 10 veces el tirante se puede considerar como flujo bidimensional.

CLASIFICACIÓN DE MEDIDORES



VERTEDOR RECTANGULAR

El más común para medir agua de manantiales es el rectangular de pared delgada con contracciones laterales estándar, para caudales de 28 a 280 l/s; la carga, h , sobre la cresta debe ser mayor a 6.0 cm y la longitud de la cresta, L , debe ser mayor a seis veces la carga, h , que se esté midiendo. Error máximo de $\pm 1.0\%$ a $\pm 2.0\%$. Tiene un rango de medición limitado



El caudal se calcula con la fórmula:

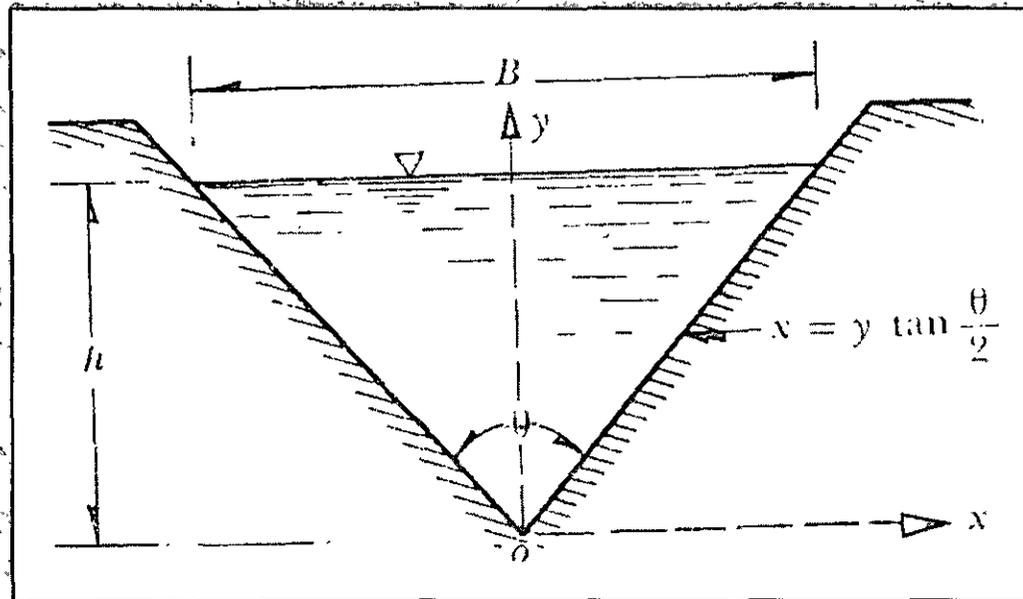
$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g\mu} b h^{3/2}$$

Coeficiente de gasto μ

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Hegly (Ref. 30) (1921)	$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \times$ $\times \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.50 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.20 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$	El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS.
Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924) (Ref. 9) (Fórmula SIAS)	$\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3(b/B)^2}{1000h + 1.6} \right] \times$ $\times \left[1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.025 \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \leq 0.3 B$ $w \geq 0.30 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$ en el caso de contracciones laterales	Para vertedores sin contracciones laterales los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $\frac{h}{w} \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$, es más precisa que la de Hegly.
Hamilton-Smith	$\mu = 0.616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$	$0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq b$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h \leq \frac{w}{2}$ $b \leq (B - 2h)$ $\frac{h}{b} \leq 0.5$	Si $B(h-w) < 10bh$, se deberá reemplazar en la Ec. (75) el valor de h por h' donde $h' = h + 1.4 \left(\frac{V_o^2}{2g} \right)$ donde: $V_o = \left[\frac{Q}{B(h+w)} \right]$ es la velocidad de llegada
Francis (Ref. 31)	$\mu = 0.623 \left[1 - 0.1n \frac{h}{b} \left[\left(1 + \frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_o^2}{2gh} \right)^{5/2} \right] \right]$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$	$V_o = \frac{Q}{B(h+w)}$ velocidad de llegada. $n = -2$ en vertedores con contracciones laterales $n = 0$ en vertedores sin contracciones laterales.
Rehbock (1929) (Ref. 9)	$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2}$	$0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \geq 0.30 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$	Vale sólo para vertedores sin contracciones laterales. Es muy precisa y de las más utilizadas, por su sencillez.

VERTEDOR TRIANGULAR SIMÉTRICO

Son recomendables para gastos menores a 30 litros/segundo y cargas > 6 cm y < 60 cm. Tienen mayor exactitud que los rectangulares. Son más sensibles a cambios en la rugosidad de la placa. Requiere una medición muy exacta de la carga sobre la cresta.



El caudal se calcula con la fórmula:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g \tan(\theta/2) \mu} h^{5/2}$$

VERTEDOR TRIANGULAR SIMÉTRICO

Coeficiente de gasto μ

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Universidad Católica de Chile (Ref. 24).	$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan(\theta/2) \mu K$	Vale para $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ La profundidad w no tiene influencia en el coeficiente de gasto.	μ , coeficiente experimental que depende de h y θ según la Fig. 7.9. K es otro coeficiente que depende de B/h según la Fig. 7.10 y vale 1 si $B/h \geq 5$ para $\theta = 90^\circ$ y si $B/h \geq 2.75$ para $\theta = 45^\circ$.
Gourley y Crimp (Ref. 31).	$C = \frac{1.32 \tan(\theta/2)}{h^{0.68}}$	Vale para ángulos θ de 45° , 60° y 90° y para profundidades w grandes.	Esta fórmula, substituida en la ecuación (7.11b), conduce a la ecuación: $Q = 1.32 \tan(\theta/2) h^{5.48}$
Hegly (1921) (Ref. 30).	$\mu = \left[0.5812 + \frac{0.00375}{h} \right] \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ $0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ y profundidades w pequeñas	Es de las fórmulas más precisas para vertedores con ángulo en el vértice $\theta = 90^\circ$.
Barr (1909) (Ref. 30).	$\mu = 0.565 + \frac{0.0087}{h^{0.5}}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas $0.05 \text{ m} \leq h \leq 0.25 \text{ m}$ $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	El valor medio $\mu = 0.593$ que resulta de esta fórmula corresponde bastante al resultado de Thompson (1861) y que substituido en la Ec. (7.11a), conduce a la ecuación: $Q = 1.4 h^{5.2}$
Koch (1923) Yarnall (1926)	$\mu = 0.58$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas muy grandes. $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	No se limita con precisión el rango de validez.
Heyndrickx (Ref. 30).	$\mu = [0.5775 + 0.214 h^{1.25}] \times \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 60^\circ$ y cargas normales.	Es bastante precisa.

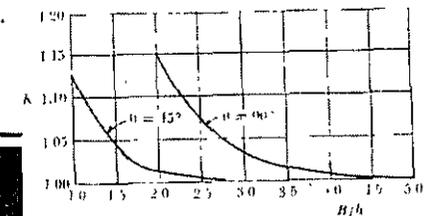
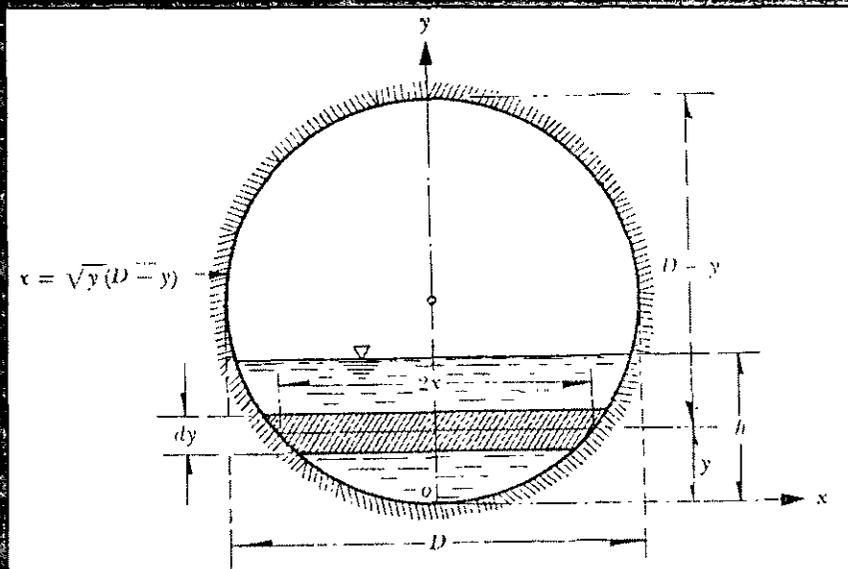


Figura 7.10. Valores de K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertedores

VERTEDOR CIRCULAR

Strauss (1931), derivó la ecuación para determinar el gasto en vertedores de forma circular.



$$\mu = 0.555 + \frac{D}{110h} + 0.041 \frac{h}{D}$$

El caudal se calcula con la fórmula:

$$Q = \phi \mu D^{5/2}$$

Coeficiente ϕ

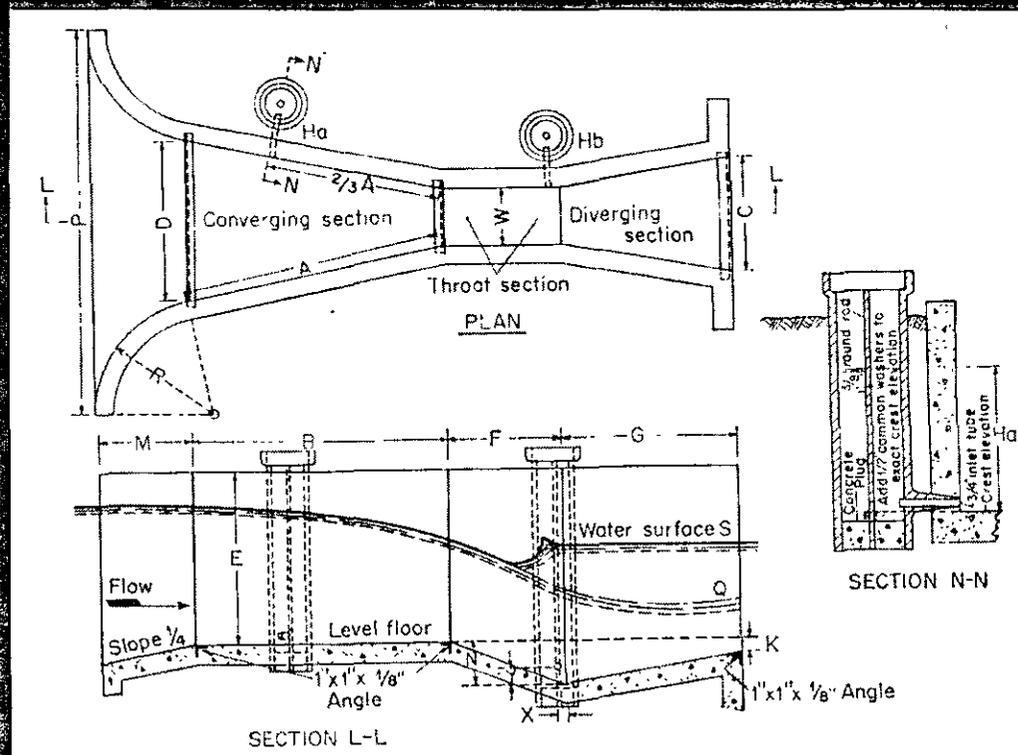
h/D	ϕ	h/D	ϕ
0.05	0.0272	0.55	2.8205
0.10	0.1072	0.60	3.2939
0.15	0.2380	0.65	3.7900
0.20	0.4173	0.70	4.3047
0.25	0.6428	0.75	4.8336
0.30	0.9119	0.80	5.3718
0.35	1.2223	0.85	5.9133
0.40	1.5713	0.90	6.4511
0.45	1.9559	0.95	6.9756
0.50	2.3734	1.00	7.4705

Válida para $0.20 \text{ m} \leq D \leq 0.30 \text{ m}$ y $0.075 < h/D < 1$ y para una distancia mín. a la frontera del canal de llegada de $3D$, medida desde los cantos del vertedor.

CANAL PARSHALL

Fue desarrollado en 1920 por R. L. Parshall.

El caudal se calcula con las siguientes fórmulas:

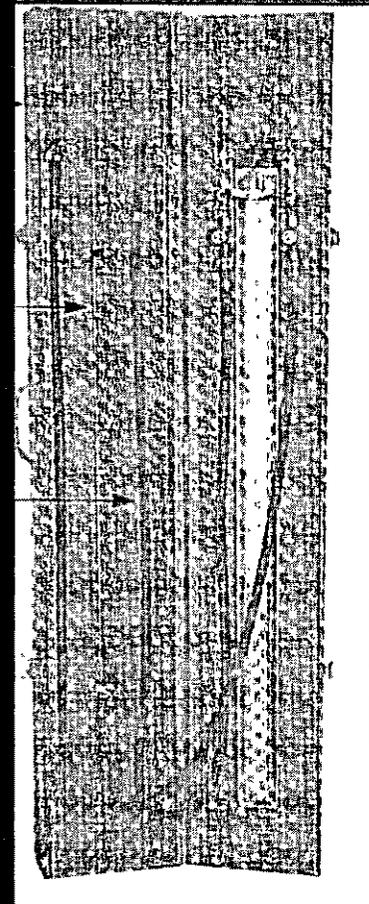
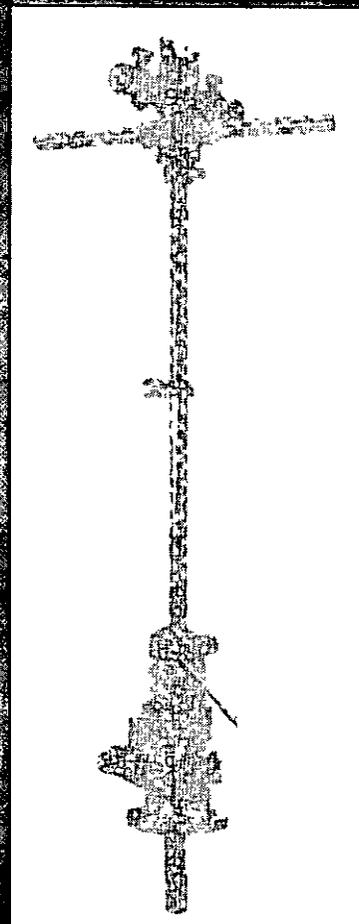
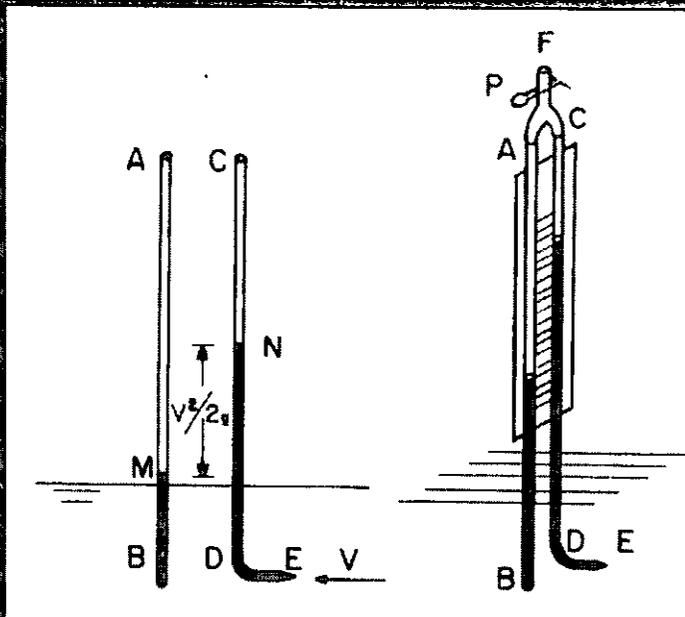


Ancho de garganta	$Q =$
3 pulgadas	$0.992 H_a^{1.547}$
6 pulgadas	$2.06 H_a^{1.58}$
9 pulgadas	$3.07 H_a^{1.53}$
1 a 8 pies	$4W H_a^{1.522} W^{0.026}$
10 a 50 pies	$(3.6875W + 2.5)H_a^{1.6}$

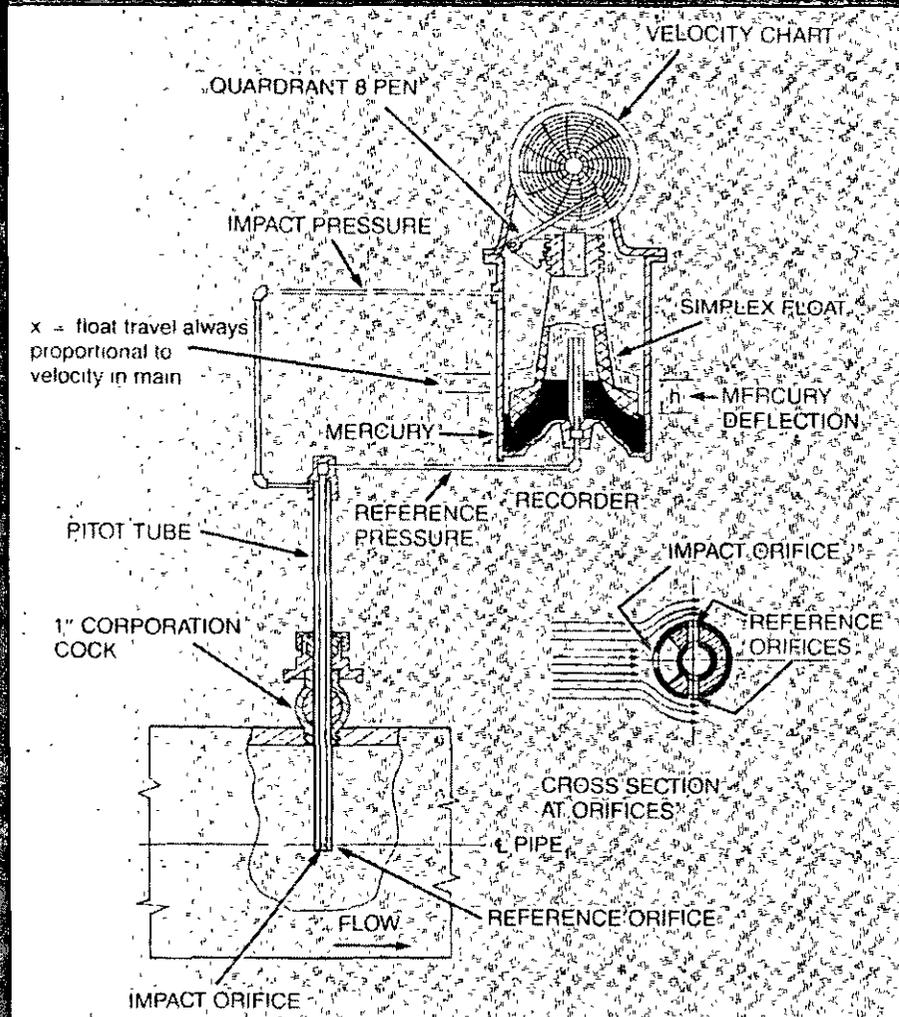
Q en pies cúbicos/seg. W es el ancho de la garganta en pies y H_a es la carga en pies

EL TUBO DE PITOT

El francés Henry de Pitot (1695-1771), inventó el aparato que lleva su nombre en el año 1732.



EL TUBO DE PITOT



El tubo de Pitot sumergido en el interior de un flujo, mide la carga de presión más la carga de velocidad ($p/\gamma + V^2/2g$) y el piezómetro mide solamente la carga de presión (p/γ), por lo cual, la diferencia en la elevación del agua entre el tubo de Pitot y el piezómetro (Δh) será igual a la carga de velocidad, de donde se despeja la velocidad:

$$V = \sqrt{2g \Delta h}$$

EL TUBO DE PITOT

El Tubo de Pitot Simplex se emplea en estaciones de medición no permanentes.

La instalación debe hacerse en secciones rectas de tubería y donde las válvulas, codos u otros accesorios estén alejados una distancia mayor a 30 diámetros, medida desde el punto donde se instalará el tubo.

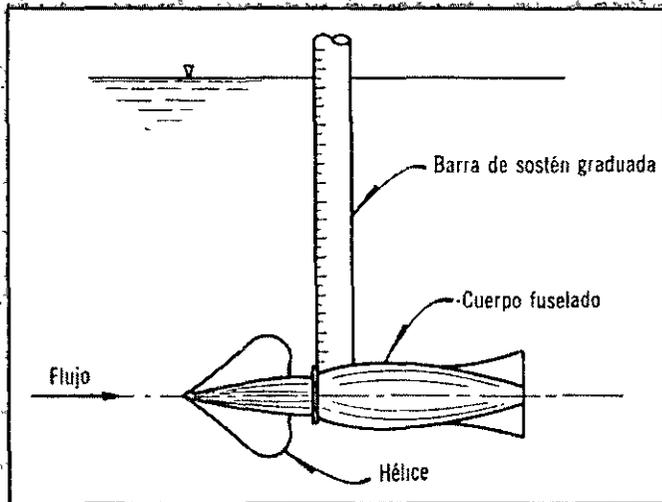
El error máximo de este aparato está entre $\pm 1.0\%$ y $\pm 4.0\%$.

Requiere personal capacitado.

No se recomienda su uso si la velocidad en el conducto es menor que 0.4 m/s , o si la presión es mayor a 15.0 kg/cm^2 o si el agua tiene sólidos en suspensión.

Para el cálculo de la velocidad se debe seguir un procedimiento establecido, donde se emplean varios coeficientes que corrigen la diferencia por reducción del área, las pérdidas por fricción en la entrada del tubo, la variación de la velocidad en el interior del tubo y otros.

MOLINETE



Molinete: envía una serie de señales: luminosas o acústicas, que relaciona el número de impulsos registrados, con la velocidad del flujo. Para el aforo en conductos forzados de gran diámetro o en corrientes naturales.

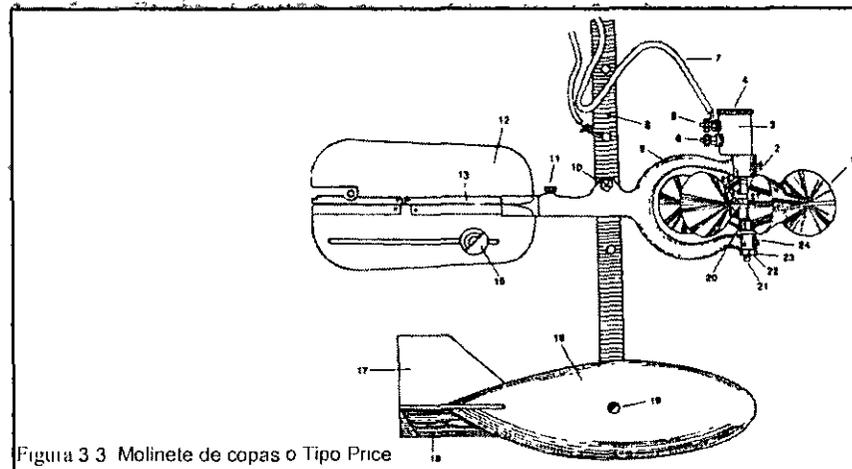
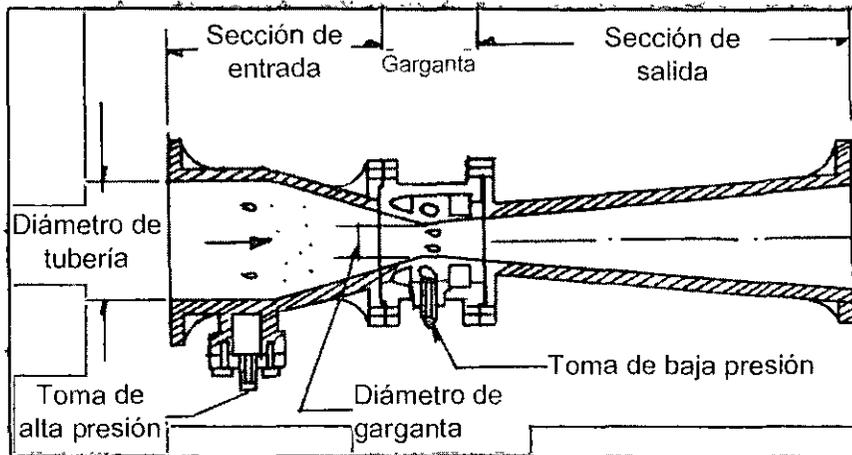


Figura 3.3 Molinete de copas o Tipo Price

VENTURI



FUE inventado por Clemens Herschel
(184-1930).

Si se mide la presión diferencial para calcular el Q.

Se emplea en estaciones de medición permanentes.

La instalación debe hacerse en secciones rectas de tubería

Cualquier accesorio estará alejado una distancia mayor a 20 diámetros.

El error máximo es de $\pm 0.75\%$.

Tiene un rango de medición limitado

Puede medir velocidades bajas con precisión (Δp 's pequeños).

Se recomienda su uso para agua sin sólidos en suspensión,

Se deben prever accesorios de limpieza Dar mantenimiento con frecuencia.

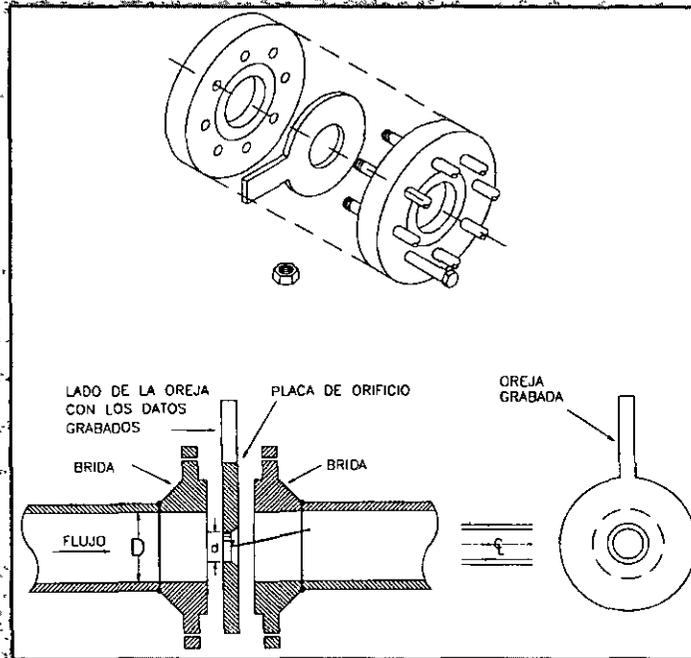
Baja pérdida de carga, no tiene partes móviles y es resistente.

Es caro comparado con otros tipos de medidores, por lo cual solo se justifica si

se requiere una precisión alta, como en: control de procesos –potabilización o

depuración–, calibración de instrumentos y medidores.

PLACA DE ORIFICIO



El caudal se calcula con la fórmula:

$$Q = \frac{CA \sqrt{2gh}}{[1 - (d/D)^4]^{1/2}}$$

Donde:

Q es el gasto, en $m^3/hora$.

A es el área del orificio, en m^2 .

g es la constante de aceleración de la gravedad, $9.81 m/s^2$.

h es la diferencia de presión entre la sección aguas arriba y la sección aguas debajo de la placa de orificio, en mca .

C es el coeficiente de descarga del orificio, no tiene dimensiones y se determina por calibración en laboratorio. En el Cuadro I.7 se pueden ver los valores para diferentes valores $b = d/D$. Donde D , es el diámetro interno de la tubería y d , el del orificio en la placa.

PLACA DE ORIFICIO

Relación d/D	para Q en m^3/h	para Q en l/s
β	C	C
0.25	2174.4	604.0
0.30	2178.0	605.0
0.35	2181.6	606.0
0.40	2181.6	606.0
0.50	2185.2	607.5
0.65	2194.2	609.5
0.70	2199.6	611.0
0.75	2257.2	627.0
0.80	2314.8	643.0

Se usa con agua que no tenga sólidos en suspensión.

Tiene alta pérdida de carga, no tiene partes móviles y es resistente.

Se deteriora en un tiempo relativamente corto si no está protegido contra la corrosión.

Este dispositivo se puede emplear como estación de medición permanente o no permanente, por su facilidad de montaje o desmontaje.

Este instrumento debe instalarse en secciones rectas de tubería y cualquier accesorio debe estar alejado una distancia mayor a lo indicado en la gráfica 2.1.

El error máximo es de $\pm 1.0\%$, pero su rango de medición es limitado. Debe verificarse en forma frecuente.

Su diseño es simple, de fácil calibración y tiene un costo bajo.

COMPARATIVO

característica	tipo de medidor		
	Placa de orificio	Propela	electromagnético
Relación q_{max}/q_{min}	4:1	(10 a 20):1	10:1
Exactitud (\pm), en % de Q_n .	0.25 a 2.0	0.5 a 2.0	0.5 a 1.0
Tipo de escala.	No lineal	Lineal	Lineal
Presión máx.de operación kg/cm^2 .	400	10 a 28	20 a 200
Temperatura max. de operación °C.	500	85	100 a 150
Pérdida de carga producida.	20 a 94% de la carga de presión diferencial	0.49 a 2.0 metros columna de agua	0 a 0.5 metros columna de agua
Longitud del tramo recto requerido; en # de diámetros:			
Hacia aguas arriba Hacia aguas abajo	mín. 5 - máx. 52 mín. 2.4 - máx 12.5	mín. 5 - máx. 25 mín. 3 - máx 10	mín. 3 - máx. 10 mín. 3 - máx 5
Materiales de construcción	Metal/plástico	Metales	Metales/caucho/ plástico/fibra
Costo relativo.	bajo	medio alto	alto
Ventajas.	Simple/económico/ poco mantenimiento/ no requiere de personal especializado para su operación.	Amplio rango de medición/baja pérdida de carga/poco mantenimiento/ puede medir agua con pocos sólidos en suspensión/sí totaliza volúmenes	Baja pérdida de carga/puede medir agua con sólidos en suspensión/sí totaliza volúmenes/señal de salida eléctrica, pulsos o digital, facilita la transmisión de datos.
Desventajas.	Se descalibra si hay sólidos en suspensión en el agua/ requiere tramos rectos grandes /requiere graficador o data logger para totalizar volúmenes/ tiene altas pérdidas de carga.	Es costoso/ Requiere personal especializado para mantenimiento y calibración.	Costo inicial alto; requiere personal especializado; la exactitud disminuye para velocidades bajas del flujo (<1 m/s). Requiere una fuente de electricidad.

SELECCIÓN DE MEDIDORES

1. NO seleccionar un medidor solo en función del diámetro de la tubería de conducción.
2. Los datos que deben conocerse, en relación con el sitio donde se va instalar el medidor, son los siguientes:
 - a.- Presupuesto disponible (<\$1000, <\$1500 o <\$2000 USD).
 - b.- Longitud máxima de tubería recta entre válvulas y/o codos y/o reducciones, medida en # de diámetros de la tubería.
 - c.- Gasto que va ser medido (<5 l/s, <8 l/s o <14 l/s).
 - d.- Exactitud requerida en las mediciones ($\pm 2.0\%$, $\pm 1.0\%$ o $\pm 0.5\%$).
 - e.- Contenido de partículas en suspensión en el agua (>50 mg/l).
 - f.- Dureza del agua ($4.5 \leq \text{pH} \leq 9.0$).
 - g.- Si hay fuente de electricidad cercana, voltaje (115/230Vca, 24V/48Vca o 24Vcd; ca=corriente alterna, cd=corriente directa).
 - h.- Máxima pérdida de carga admisible, entre la entrada y la salida del medidor, en mca ($10 \text{ mca} = 1.0 \text{ kg/cm}^2 = 14.22 \text{ psi}$).
 - i.- ¿Se requiere totalizar el caudal medido?
 - j.- ¿Tipo de señal requerida a la salida?
 - o analógica: amperaje (0/2-10mA, 0-5mA, 0/4-20mA, 4-12 mA, 10-20 mA, 12-20 mA; mA = milliamperes);
 - o pulsos o digital: capacidad ($100,000.0 \text{ m}^3$ o $1,000,000 \text{ m}^3$ o $10,000,000 \text{ m}^3$, y registro mínimo 0.01 m^3 o 0.1 m^3 o 1.0 m^3 por pulso).
 - k.- Intervalo de variación del caudal a medir o relación $q_{\text{máx}}/q_{\text{mín}}$ (<4:1, $\leq 20:1$, $>20:1$).

SELECCIÓN DE MEDIDORES

- l.- Diámetro nominal de la tubería (2" a 12" o >12").
- m.- Material y espesor o calibre o clase de la tubería.
- n.- Tipo de unión requerido: bridas, rosca o extremidad (lisa).
- o.- ¿Máxima preparación del personal que se tiene disponible para la operación y mantenimiento de macromedidores?: profesionalista, especialista, técnico o base.
- p.- ¿Qué tipo de instalaciones se tienen disponibles para el mantenimiento y reparación de macromedidores?: taller o laboratorio de pruebas.
- q.- ¿Qué tipo de lectura se requiere?: manual, electrónica, por transmisión remota.
- r.- ¿Qué tipo de procesamiento de la información de lecturas se requiere?: manual o sistema de información automatizado.

Si el agua contiene sedimentos en exceso, no seleccionar: placa de orificio. Para el medidor tipo propela se debe solicitar la instalación de una coladera o filtro.

Si no se tiene suficiente longitud recta de tubería en el sitio de instalación, para cumplir con los requisitos generales indicados en el cuadro I.1, se debe revisar si con la instalación de un rectificador de flujo se puede satisfacer el requisito.

Se revisan las dimensiones, peso y forma de instalación de cada tipo de medidor y se listan, para la compra, las piezas especiales que se requieran.

Se revisa el tipo y la capacidad del dispositivo de lectura requerido, así como la compatibilidad con los equipos y sistemas que se van a utilizar para procesar la información.

Con los datos anteriores, se solicitan cotizaciones a los proveedores de diferentes marcas de medidores.

Se compara, entre los medidores que cumplen con los requisitos: costo, calidad y vida útil, piezas especiales requeridas, periodos de mantenimiento preventivo, costo y facilidades para obtener asistencia técnica y refacciones y preparación requerida para el personal que se va a encargar de la operación y mantenimiento.

PARÁMETROS DEL FLUJO DE FLUIDOS

- El movimiento de un fluido se explica por las ecuaciones del movimiento que consideran a las fuerzas más importantes que intervienen en el flujo, por unidad de masa.
- No obstante, de acuerdo con el problema particular, este se caracteriza por la importancia de una fuerza cuya influencia es preponderante en el movimiento y que prácticamente elimina a las restantes, ejerciendo su acción sobre la fuerza de inercia.
- En general, la importancia de la fuerza preponderante se compara con la de inercia, lo que da origen a tres parámetros sin dimensiones
- Estos parámetros se pueden obtener de las ecuaciones del movimiento, de los fluidos o directamente de la segunda ley de Newton.

PARÁMETROS DEL FLUJO DE FLUIDOS

El primer parámetro se llama *número de Euler* y rige en aquellos fenómenos donde son preponderantes los cambios de las presiones; es decir, en fenómenos de flujo ocasionados por un gradiente de presiones donde la densidad y la aceleración del fluido intervienen primordialmente en el fenómeno y las fuerzas viscosas pierden importancia. Esto ocurre en problemas de flujo a presión como en las tuberías, orificios, válvulas, compuertas, distribución local de presiones sobre un obstáculo, etcétera, se escribe comúnmente así:

$$E_u = \rho \frac{v^2}{\Delta p} = \frac{v^2}{g h}$$

El segundo número se llama de *Reynolds*. Es válido en aquellos flujos a poca velocidad donde las fuerzas viscosas son las más importantes. Un número de Reynolds grande indica una preponderancia marcada de las fuerzas de inercia sobre las viscosas, como –por ejemplo– el flujo turbulento. El número de Reynolds se usa a menudo como el criterio de semejanza en la prueba de modelos de naves aéreas, cuerpos sumergidos en un flujo, medidores de gasto, transiciones en conductos, etcétera, en los cuales las características del flujo están sujetas a efectos viscosos. Este número se puede escribir como:

$$R_e = \frac{v l}{\nu}$$

SELECCIÓN DE MEDIDORES

El tercer número se llama de Froude y en general se representa como la raíz cuadrada de la relación de fuerzas, es decir:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g l}}$$

El número de Froude tiene importancia en flujos con velocidades grandes que ocurren por la acción exclusiva de la gravedad; tal es el caso del flujo turbulento a superficie libre, donde los efectos viscosos son despreciables. A medida que aumenta el número de Froude, mayor es la reacción inercial de cualquier fuerza; en tanto disminuye, mayor es el efecto de la fuerza gravitacional. Cuando el flujo es horizontal, la acción del peso desaparece y con ella la influencia del número de Froude.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**

PITOMETRÍA

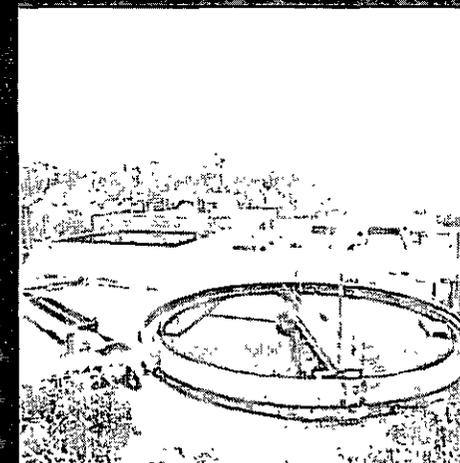
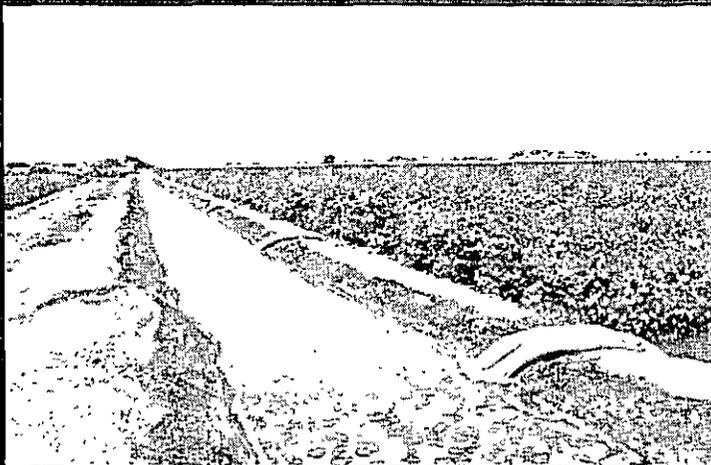
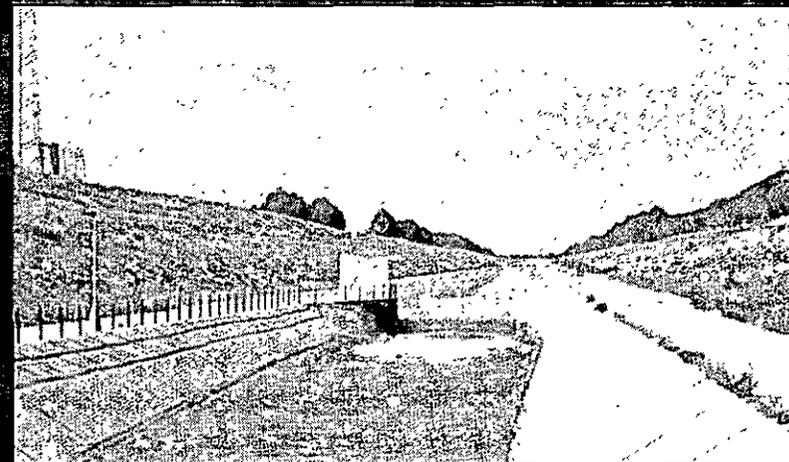
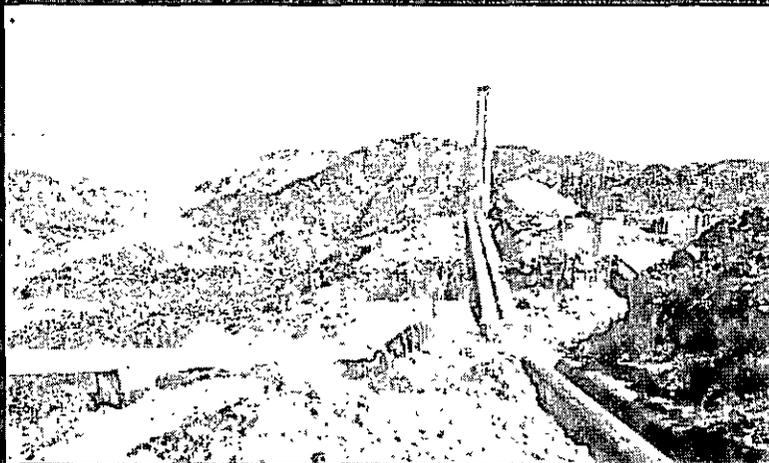
CA 426

**CONTROL DE PÉRDIDA Y
USO EFICIENTE DEL AGUA PARTE II**

**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**



PITOMETRÍA PARA EL CONTROL DE PÉRDIDAS Y USO EFICIENTE DEL AGUA



SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA

FÓRMULA DE CHÉZY

En 1769, el ingeniero francés Antoine Chézy estaba desarrollando la primera fórmula de flujo uniforme que se expresa como:

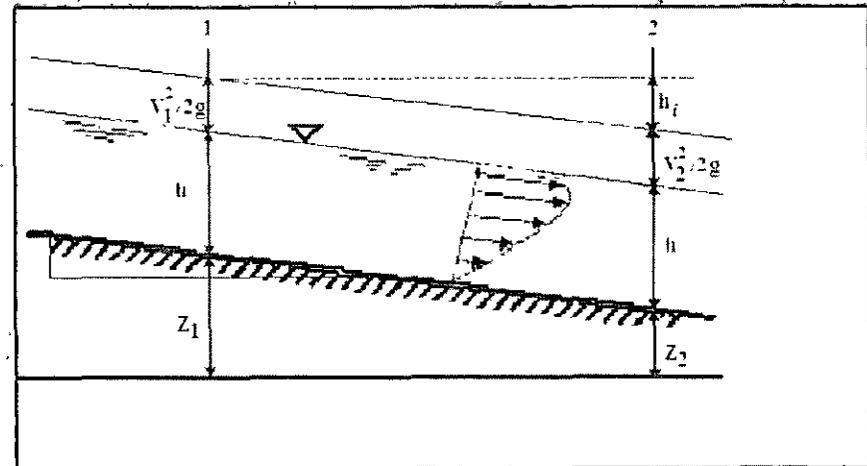
$$V = C \sqrt{R_h S}$$

V es la velocidad media en m/seg,

R_h es el radio hidráulico, en metros,

S es la pendiente de la línea de energía, y

C es un factor de resistencia al flujo, llamada C de Chézy.



FÓRMULA DE CHÉZY

Primera suposición: la fuerza que se opone al flujo por unidad de área en la frontera del fondo del canal es proporcional al cuadrado de la velocidad; esto es, que dicha fuerza es igual a KV^2 , donde K es una constante de proporcionalidad.

Segunda suposición es que en un flujo uniforme, la componente efectiva de la fuerza de gravedad que produce el flujo debe ser igual a la fuerza total que se opone al flujo es igual a: KV^2/PL

FÓRMULA DE CHÉZY

La C de Chézy

Tabla 2.2. Fórmulas usuales para el cálculo del factor de fricción C de Chezy. En estas fórmulas, R_h radio hidráulico en m, S pendiente hidráulica.

Autor	Fórmula	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{R_h}}$	Se aconseja para canales naturales para los cuales — usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es — compleja y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n, donde n es un coeficiente que depende de la rugosidad del canal según tabla 2.3
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter y por tanto más sencilla. m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{B}{\sqrt{R_h}}}$	Está basada en una buena cantidad de experiencias y es relativamente sencilla. B es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Kozeny	$C = 20 \log Y + N_c$	es análoga a la de los tubos y fue obtenida con base — en los resultados experimentales de van Mises y Bazin. Y es el tirante hidráulico en m y N_c un coeficiente — de rugosidad según la tabla 2.3.
Martínez	$C = 17.7 \log \frac{R_h}{d} + 13.6$	Fue obtenida de muchas mediciones en ríos de la Unión Soviética. d es el diámetro del grano del material en el fondo del río en m y vale para $0.15 \leq R_h \leq 2.25m$, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d \leq 0.25m$ (ref 12)
Manning - Strickler	$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$	Fue obtenida a partir de siete fórmulas diferentes basadas en ensayos de Bazin y posteriormente verificada — por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es un coeficiente de rugosidad según la — tabla 2.4.
Pavlovski	$C = \frac{R_h^z}{n}$	<i>n, mismo coeficiente de rugosidad de Manning</i> Considera que el exponente en la fórmula de Manning no es una constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad como sigue $Z=1.5 n$ para $R_h < 1 m$ y $Z=1.3\sqrt{n}$ para $R_h > 1 m$.

FÓRMULA DE MANNING

En 1880, el ingeniero irlandés Robert Manning, con base en la fórmula de Chézy, presentó su fórmula que se expresa como:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

V es la velocidad media en m/seg,

R_h es el radio hidráulico, en metros,

S es la pendiente de la línea de energía, y

n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Método de sección - pendiente

El uso directo de la fórmula de Manning para la determinación del gasto es conocido como método de sección - pendiente.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Es necesario conocer las características del tramo de río donde se desea aforar, así como el tirante.

El tramo seleccionado debe tener una longitud recta de 300 metros y la sección elegida debe ser lo más uniforme posible.

Método de sección - pendiente

Determinar el caudal en un canal trapecial, usando la fórmula de Chezy y la de Manning, con los siguientes datos:

$$V = C \sqrt{R_h S}$$

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

$$y = 1.20 \text{ m}$$

$$z = 2:1$$

$$S = 0.000667$$

$$n = 0.017$$

$$b = 2.0 \text{ m.}$$

Método de sección - pendiente

Determinar el caudal en un canal trapezoidal, usando la fórmula de Chezy y la de Manning, con los siguientes datos:

$$A = b y + z y^2 = 1.2 (2) + 2(1.2^2) = 5.28 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y\sqrt{1+z^2} = 2 + 2(1.2)\sqrt{1+2^2} = 7.366$$

$$R = \frac{5.28}{7.36} = 0.71675$$

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{s}}{1 + (23 + \frac{0.00155}{s}) \frac{n}{\sqrt{R_h}}} = \frac{23 + \frac{1}{0.017} + \frac{0.00155}{0.000667}}{1 + (23 + \frac{0.00155}{0.000667}) \frac{0.017}{\sqrt{0.7167521}}} = 55.782$$

$$Q = 6.436$$

DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLACA DE ORIFICIO

La ecuación general para calcular el gasto descargado a través de una placa de orificio es:

$$Q = \frac{CA\sqrt{2gh}}{[1 - (d/D)^4]^{1/2}}$$

Se recomienda no utilizar relaciones de $\beta = d/D$ menores a 0.15, La pérdida de carga, h_f , se puede calcular en forma aproximada de acuerdo con la relación β como se indica en el cuadro siguiente:

$\beta =$	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.75
h_f , en % de h	96	92	85	76	67	55	48

El espesor de la placa debe ser adecuado para evitar que se doble bajo la fuerza del flujo y no debe exceder $1/50$ del diámetro de la tubería, D , o de $1/2$ del diámetro del orificio, d .

PLACA DE ORIFICIO

Ejemplo 1:

Calcular el gasto Q , en m^3/h , y la pérdida de carga para:

$$D = 8 \text{ pulgadas (200 mm = 0.20 m)}$$

$$d = 6 \text{ pulgadas (150 mm = 0.15m)}$$

$$h = 7.5 \text{ pies (7.5 pies} \times 0.3048 \text{ m/pie} = 2.286 \text{ m)}$$

$$A = \pi \times d^2/4 = 3.1416 \times (0.15)^2/4 = 0.01767 \text{ m}^2$$

$$\beta = d/D = 0.15/0.20 = 0.75$$

$$Q = \frac{2257.2 * 0.01767 * \sqrt{2 * 9.81 * 2.286}}{[1 - (0.75)^4]^{1/2}} = 323.07 \text{ m}^3 / \text{h}$$

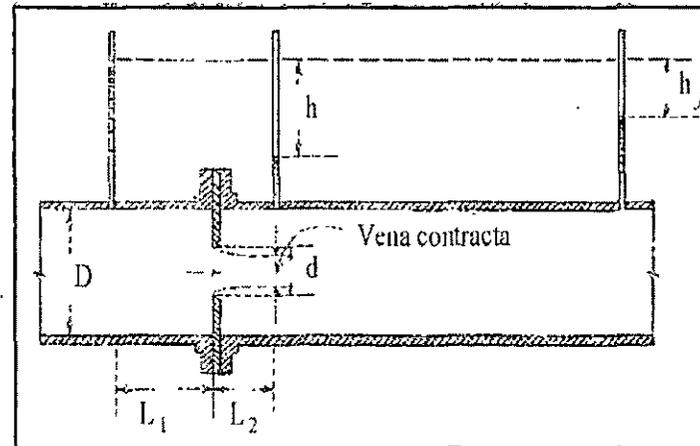
Del cuadro I.7, para $\beta = 0.75$, en m^3/h le corresponde $C = 2257.2$

La pérdida de carga, h_f , para $\beta = 0.75$ es de 48% de la carga h , por lo que resulta:

$$h_f = 0.48 \times 2.286 = 1.097 \text{ m}$$

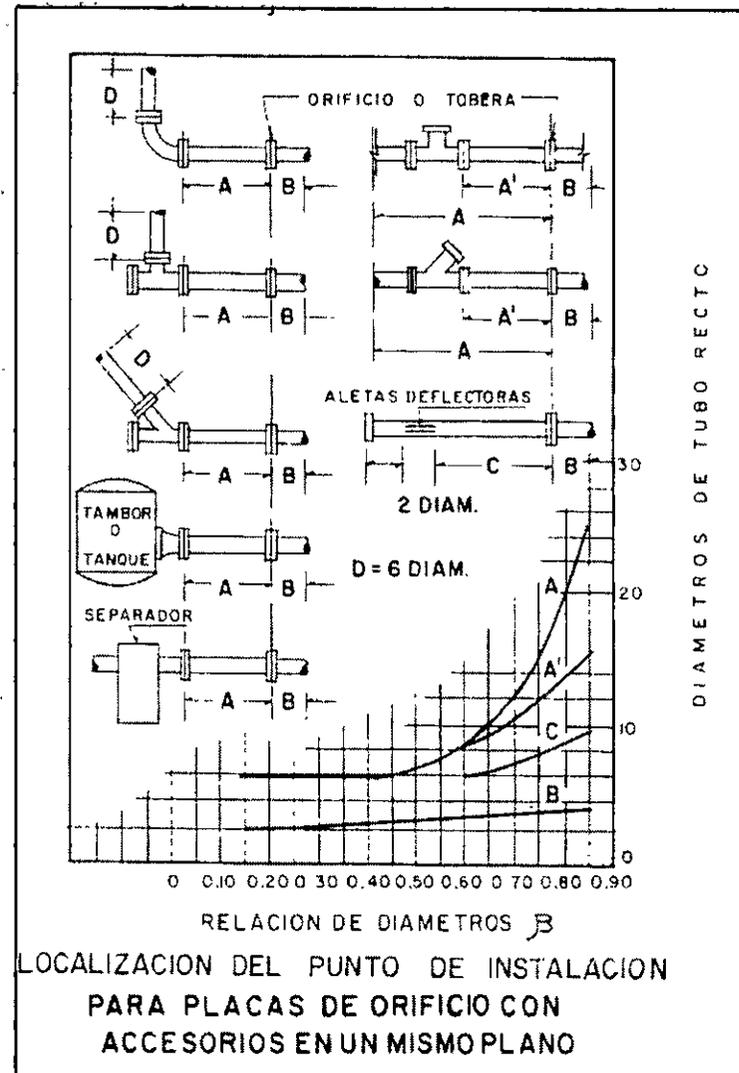
PLACA DE ORIFICIO

Tomas de presión:



PLACA DE ORIFICIO

Ubicación:



INSTALACIÓN MEDIDORES DE PROPELA

La instalación de los medidores en carrete no requieren de un especial cuidado;

En el caso de los de silleta y de espada medir cuidadosamente el espesor de la pared del tubo o su diámetro interior y exterior (cuando la propela queda fuera del área que corresponde a la velocidad media dentro de la tubería, se pueden tener errores mayores al 5%.

En todo caso, se debe preguntar al fabricante si el medidor tiene algún factor de corrección por el espesor del tubo.

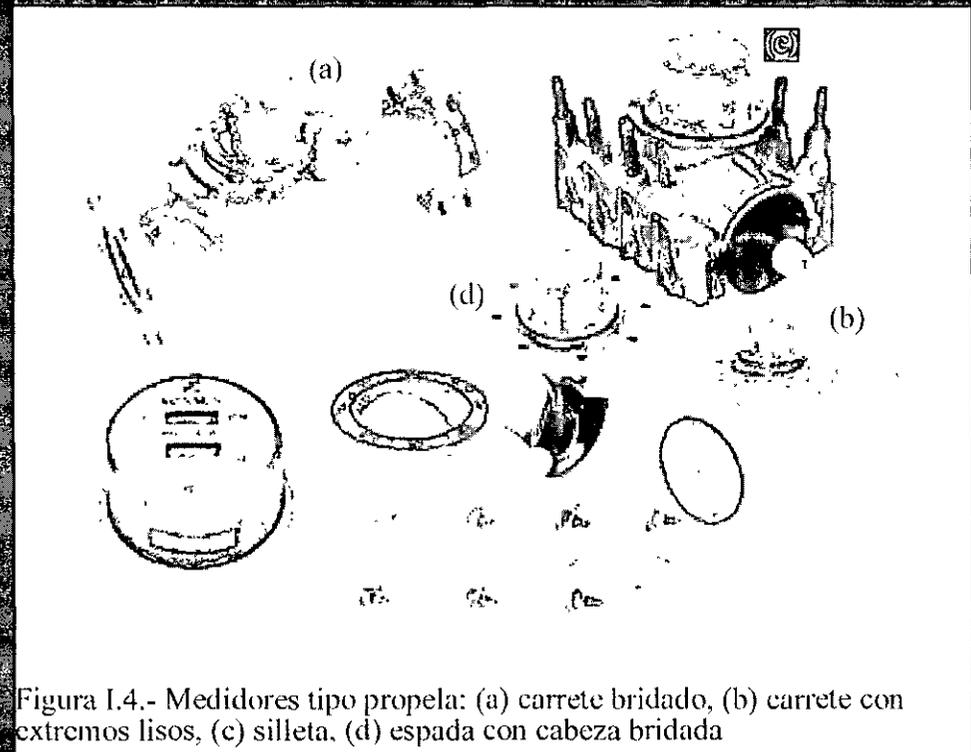


Figura I.4.- Medidores tipo propela: (a) carrete bridado, (b) carrete con extremos lisos, (c) silleta, (d) espada con cabeza bridada

INSTALACIÓN MEDIDORES DE PROPELA

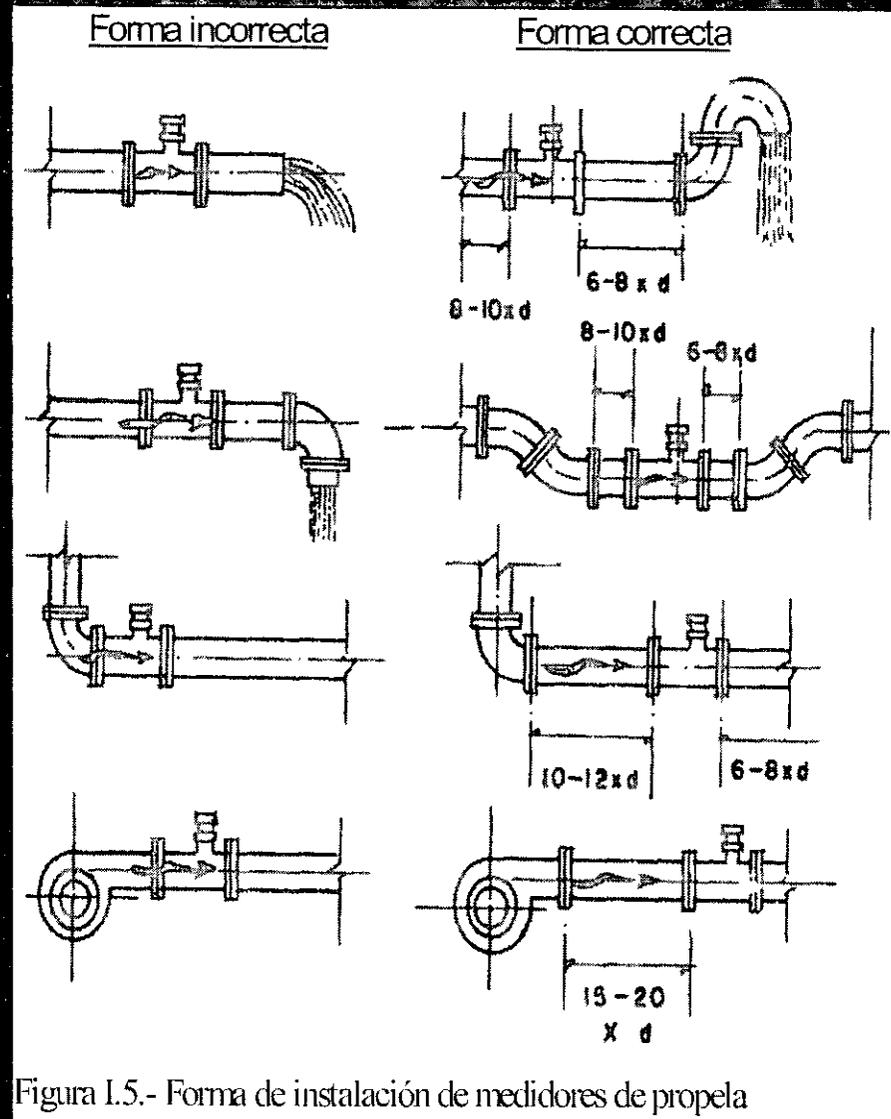


Figura I.5.- Forma de instalación de medidores de propela

INSTALACIÓN MEDIDORES DE PROPELA

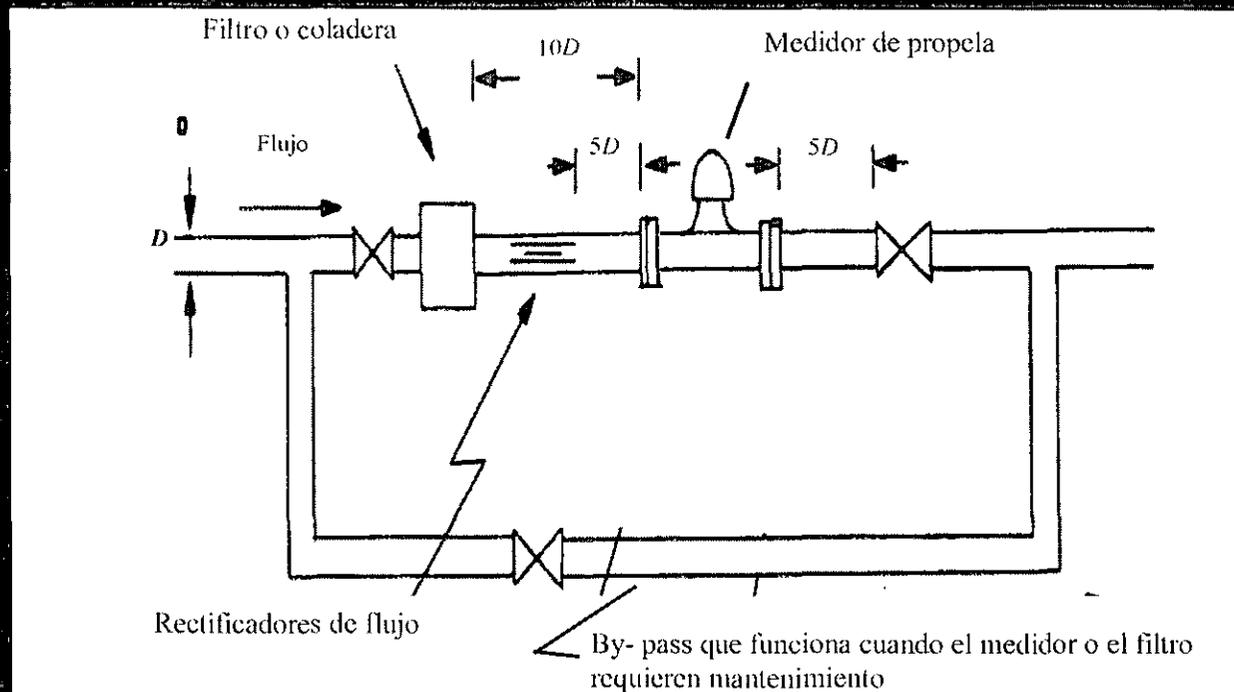


Figura 1.6.- Esquema en planta para la instalación de un medidor de propela en la descarga de un pozo

MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO

Miden el flujo en forma bidireccional; si el flujo cambia de dirección, siguen midiendo

Estos medidores se pueden instalar en tuberías horizontales, verticales o inclinadas, pero la tubería siempre debe trabajar a tubo lleno (a presión), y el eje de los electrodos debe estar horizontal.

El medidor debe instalarse en secciones rectas de tubería. Cualquier accesorio debe estar alejado, como mínimo, una distancia mayor a 5 diámetros aguas arriba y mayor a 3 diámetros aguas abajo del medidor, para el tipo carrete y de 10 a 24 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo para el tipo inserción.

Estos medidores deben tener siempre una conexión a tierra para lograr un óptimo funcionamiento.

MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO

Ubicación

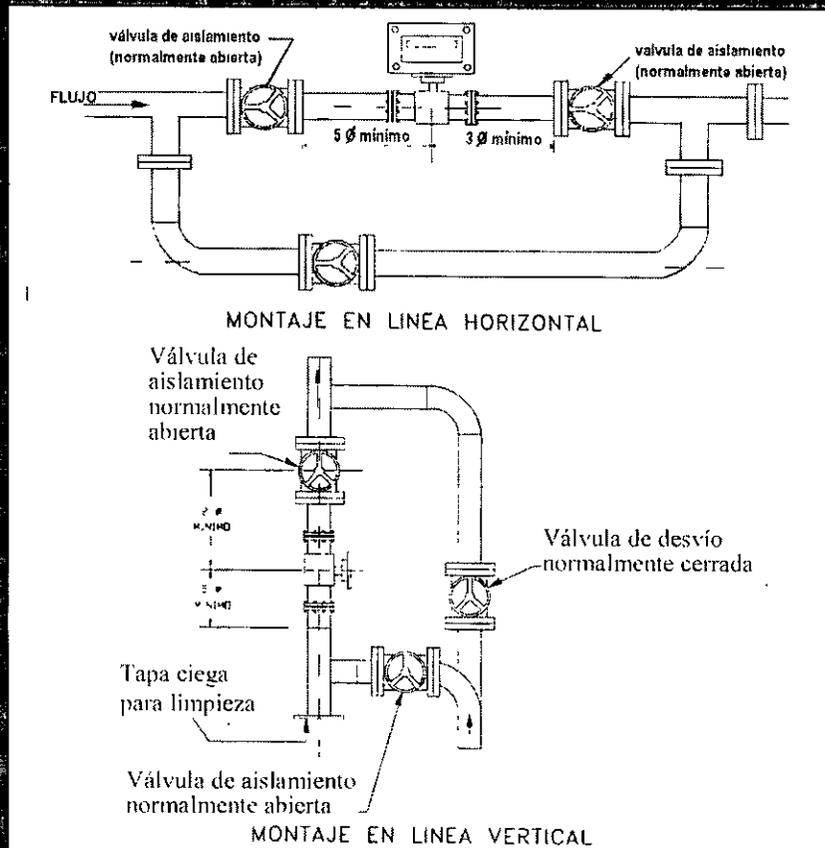


Figura I.9.- Localización de medidores electromagnéticos en carrete.

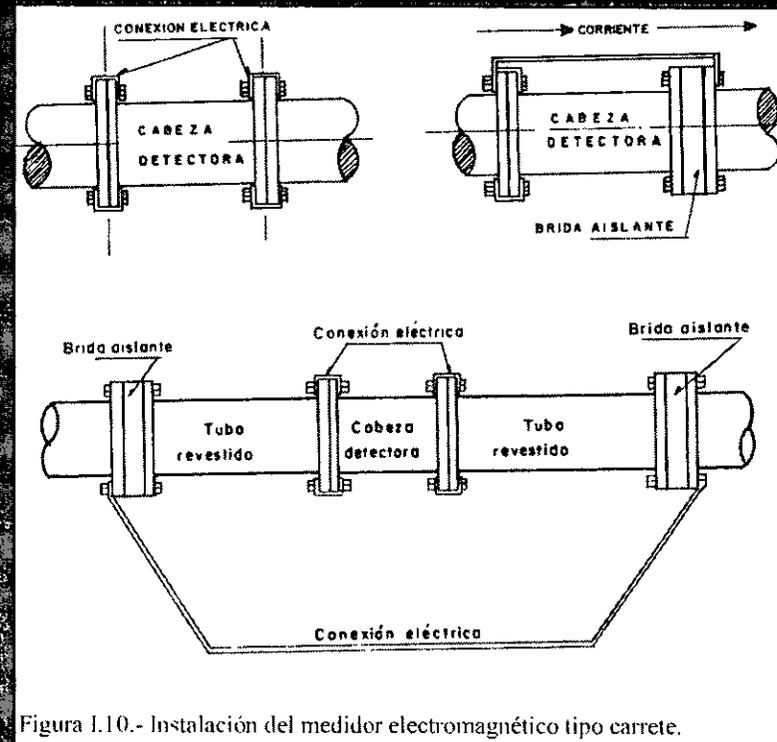


Figura I.10.- Instalación del medidor electromagnético tipo carrete.

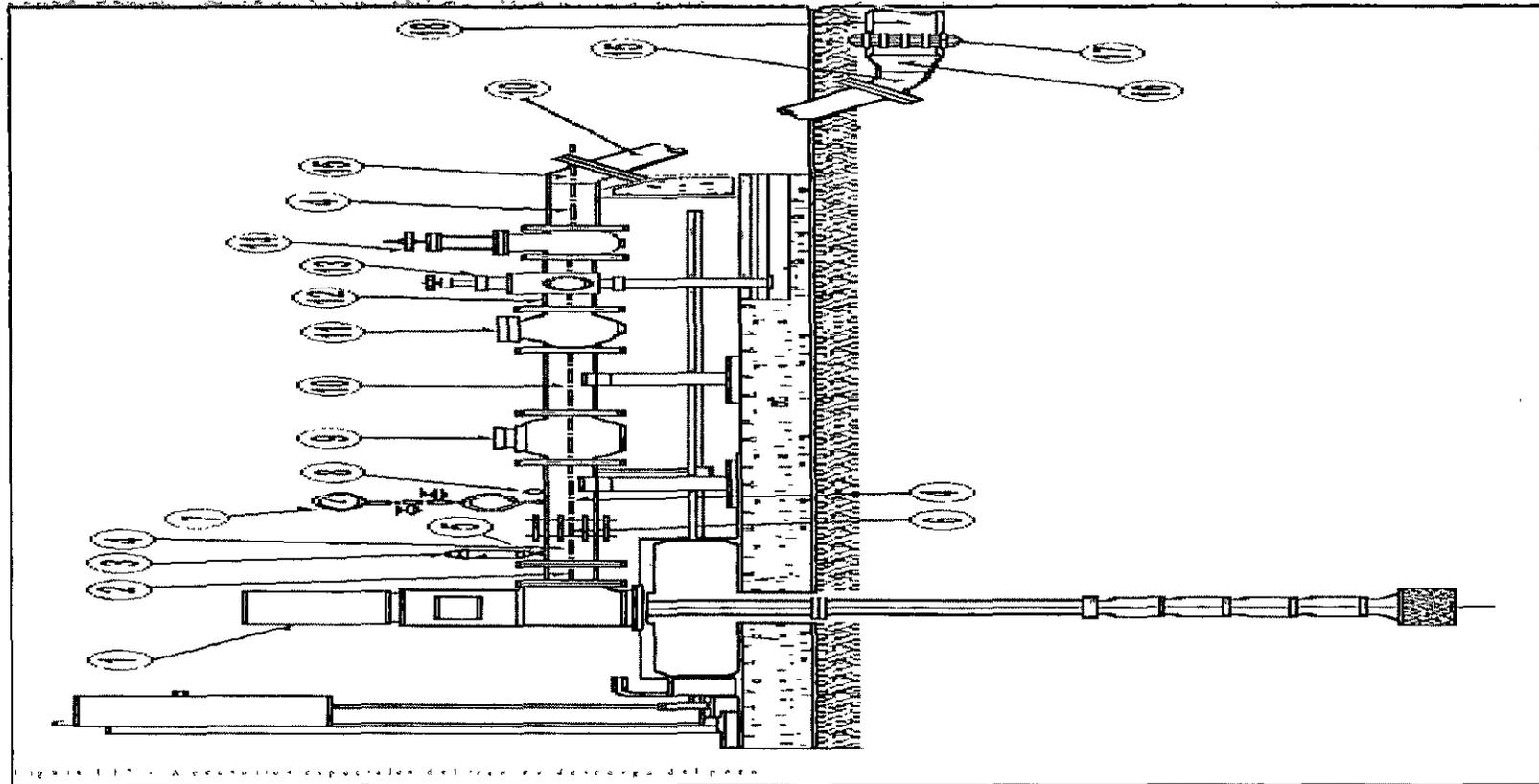
ACCESORIOS

A continuación se muestran los accesorios que conforman el llamado "tren de descarga en pozos":

1. Bomba vertical del pozo.
2. Cabezal de descarga o adaptador para descarga del pozo.
3. Válvula de admisión/expulsión (a/e) de aire.
4. Extremidad de FoFo o de acero al carbón cédula 40 con bridas soldables slip-on.
5. Cople soldable con rosca para instalar válvula a/e de aire.
6. Junta Dresser.
7. Manómetro Bourdon.
8. Válvula de inserción para tubo Pitot.
9. Medidor de caudal y totalizador (placa de orificio, propela o electromagnético).
10. Carrete de FoFo (o acero al carbón Céd. 40, bridas soldables).
11. Válvula de retención (válvula Check).
12. "T" con reducción.
13. Válvula aliviadora de presión.
14. Válvula de compuerta.
15. Codo 45° de acero al carbón cédula 40, brida soldable slip-on.
16. Reducción excéntrica, de acero al carbón cédula 40.
17. Junta Gibault.
18. Tubería de conducción a presión.

ACCESORIOS

Tren de descarga en pozos



COLOCACIÓN

Recomendaciones

Drenar las instalaciones antes de instalar el medidor o después de haber hecho alguna reparación aguas arriba.

Limpiar cuidadosamente el medidor antes de instalar.

No instalar en puntos altos de las líneas donde se pueden acumular bolsas de aire.

No instalar medidores electromagnéticos cerca de líneas de alta tensión y revisar que tenga conexión a tierra.

La tubería donde se instalará el medidor siempre debe trabajar a presión (tubo lleno).

Cuidar que: las juntas de las bridas, las tomas de presión y otros elementos, no se proyecten hacia el interior de la tubería.

Cuando se instala una válvula de inserción para tubo *Pilot*, se recomienda utilizar una silleta para su colocación. La distancia de tubería recta hacia aguas arriba de esta válvula debe ser mayor a 30 diámetros. Si se instalan aletas rectificadoras de flujo, la distancia se puede reducir hasta 9 diámetros.

El procedimiento de prueba

- 1.- Se instala el medidor en el banco de pruebas, se revisa que no haya fugas y se escribe la fecha, hora y datos del banco de pruebas en la hoja de control.
2. Se toman los datos del medidor (número de serie, marca, modelo, diámetro y caudal nominales).
3. Se establece un caudal cercano a 5% del caudal nominal del medidor (se usa un rotámetro).
4. Se cierra la válvula de paso hacia el medidor para detener el registro y se toma la lectura inicial, L_i , del volumen registrado en la carátula del medidor.
5. Se abre la válvula de paso hacia el medidor, al mismo tiempo se inicia el registro del tiempo con un cronómetro y se registra la presión antes y después del medidor, $P_{entrada}$ y P_{salida} .

El procedimiento de prueba

6. Cuando el tanque de aforo (mide el volumen real, V_{real}), se haya llenado hasta el volumen indicado en el cuadro O.1, se cierra la válvula de paso hacia el medidor, para detener el registro y al mismo tiempo se detiene el cronómetro.
7. Se registra la lectura final, L_f , del medidor y el tiempo, T , medido con el cronómetro.
8. Con el mismo gasto establecido, se repite la secuencia desde el paso 4, hasta completar tres grupos de registros.
9. Se modifica el gasto para establecerlo sucesivamente a un caudal cercano a: 15%, 25%, 50% y 70%, del caudal nominal del medidor y se repite la secuencia desde el paso 4.
10. Después de completar todos los registros, se calcula el error y el caudal promedios de tres los registros obtenidos hasta el paso 8 y se hace lo mismo para el resto de caudales establecidos.

El procedimiento de prueba

10. Después de completar todos los registros, se calcula el error y el caudal promedios de tres los registros obtenidos hasta el paso 8 y se hace lo mismo para el resto de caudales establecidos.
11. Este error promedio calculado se asocia al % del caudal nominal promedio establecido, para determinar un punto en la gráfica de error vs % del caudal nominal.
12. Por último, de acuerdo con su definición, la precisión es el máximo valor de los errores promedio obtenidos en el paso 10; separando el máximo error para el campo inferior de medición y para el campo superior. Estos valores se comparan con los valores admisibles por las normas vigentes.

Procedimiento de prueba

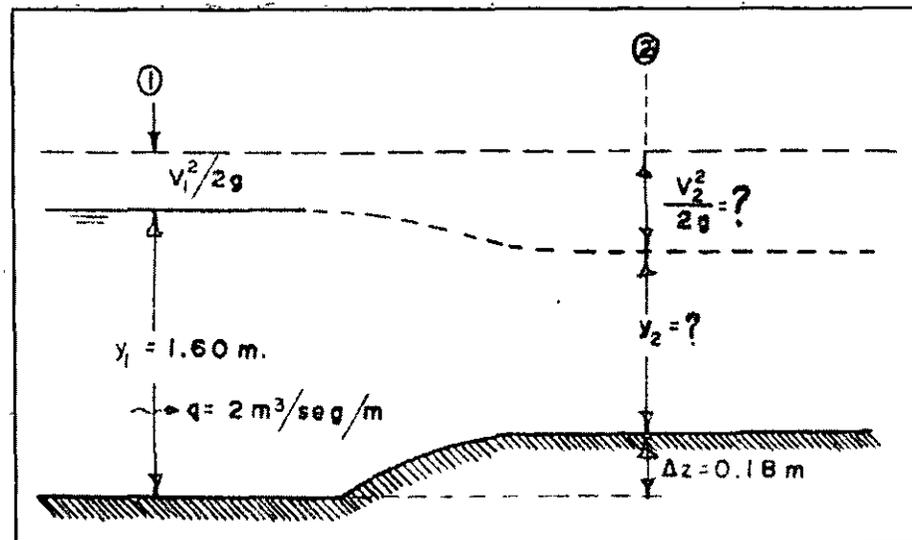
Tamaño		Campo Inferior				
<i>mm</i>	<i>pulg</i>	q_{mm}	m^3/h	<i>gpm</i>	<i>Vol. litros</i>	<i>gal</i>
75	3			7.94 35	380	100
100	4			10.22 45	380	100
125	5			15.89 70	760	200
150	6			19.30 85	1140	300
200	8			20.43 90	1140	300
250	10			24.98 110	1140	300
300	12			31.79 140	1520	400

Procedimiento de prueba

Tamaño		Campo Inferior				
<i>mm</i>	<i>pulg</i>	q_{\min}	m^3/h	<i>gpm</i>	<i>Vol. litros</i>	<i>gal</i>
75	3	7.94		35	380	100
100	4	10.22		45	380	100
125	5	15.89		70	760	200
150	6	19.30		85	1140	300
200	8	20.43		90	1140	300
250	10	24.98		110	1140	300
300	12	31.79		140	1520	400

ENERGÍA ESPECÍFICA Y RÉGIMEN CRÍTICO

Problema.- La constricción en el canal rectangular mostrado en la fig 4.8 es suficientemente gradual y lisa como para despreciar la pérdida de energía; en ella no existe cambio en el ancho de la plantilla, sino únicamente en su nivel. Conocidas las condiciones en la sección 1 determinar las de la sección 2.



ENERGÍA ESPECÍFICA Y RÉGIMEN CRÍTICO

Solución.

Siendo el gasto por unidad de ancho $q = 2 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$ y $y_1 = 1.60 \text{ m}$, la velocidad y la carga de velocidad serán:

$$V_1 = \frac{q}{y_1} = \frac{2.6}{1.6} = 1.25 \text{ m / seg}$$

De la ecuación de la energía o de Bernoulli entre las secciones 1 y 2, resulta:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{(1.25)^2}{19.62} = 0.08 \text{ m}$$

sustituyendo valores se obtiene:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \Delta z = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Sustituyendo $V_2 = q/y_2 = 2/y_2$, en la ecuación anterior, se obtiene lo siguiente:

$$1.60 + 0.08 + 0.18 = 1.50 \text{ m} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

De donde se observa que físicamente debe existir un solo tirante en la sección 2 que satisfaga las condiciones de la sección aguas arriba tiene:

$$y_2 + \frac{4}{2g y_2^2} = 1.5$$

$$y_2^3 - 1.5y_2^2 + 0.204 = 0$$

ENERGÍA ESPECÍFICA Y RÉGIMEN CRÍTICO

Cuando el tirante es menor que el crítico, la velocidad es mayor que la crítica y el flujo se encuentra en estado o régimen supercrítico. En cada régimen, el tirante y la velocidad adquieren el nombre que corresponda (subcríticos o supercríticos).

Se observa que para ir de A a B el tirante disminuye, por tanto, la velocidad y carga de velocidad deben aumentar. Debido a que la línea de energía permanece al mismo nivel, la superficie del agua debe descender sobre el escalón.

En el caso específico del problema, es evidente que el régimen en la sección 1 es subcrítico con energía específica de valor:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 1.60 + 0.08 = 1.68$$

ENERGÍA ESPECÍFICA Y RÉGIMEN CRÍTICO

Las propiedades analíticas del régimen crítico se pueden derivar atendiendo a la definición antes dada. Para un gasto constante, la derivada con respecto a y

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{g A^3} \frac{dA}{dy}$$

Puesto que el estado crítico se produce para la energía específica mínima, por el criterio de la primera derivada ($dE/dy = 0$), se obtiene:

$$F_{rc} = \frac{V_c}{\sqrt{g Y_c}} = \frac{Q}{A_c \sqrt{g Y_c}} = 1$$

○ bien

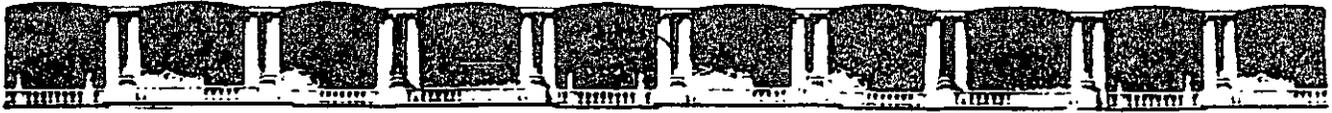
$$F_{rc} = \frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c}$$

La primera ecuación indica que el número de Froude para el estado crítico vale 1. La segunda presenta una clara relación entre las condiciones de gasto en la sección contra elementos geométricos de la misma, éstos dependientes únicamente del tirante.

ENERGÍA ESPECÍFICA Y RÉGIMEN CRÍTICO

Resumiendo, de la ecuación anterior resulta:

$$\frac{Q_{\max}^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c}$$



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**



**EXPOSITOR: ING. SERGIO ENRIQUEZ ZAPATA
DEL 03 AL 07 DE DICIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

MACROMEDICIÓN

■ Qué es una estrategia de medición?

Es utilizar todos los elementos que se conocen sobre los medidores, los métodos de medición y el funcionamiento del sistema de agua y saneamiento, para lograr los objetivos de la macromedición, por ejemplo, se plantea que con el empleo de un mínimo de instrumentos se obtengan los volúmenes que son entregados y utilizados en partes críticas del sistema y verificar si están debidamente justificados

Esto permite identificar anomalías y corregirlas oportunamente
En esta etapa del trabajo se debe tomar en cuenta la situación financiera y el desarrollo institucional de cada organismo, por lo que se requiere determinar un orden de prioridades

■ Primer paso

Identificar la ubicación de los puntos donde se requiere medir, para esto, se debe tener información suficiente y confiable de las obras de infraestructura y sobre su funcionamiento

MACROMEDICIÓN

Segundo paso

Para cada UO, se definirá lo siguiente: periodo y frecuencia de medición que se reportará, formatos estándar que se emplearán para el registro de datos y selección de unidades de medición apropiadas y homogéneas

Tercer paso

Definir los límites de caudal o demanda que van a ser medidos. En el caso de la red de distribución, se determinan por áreas de población abastecida o distritos hidrométricos, con esto, también se determina el número, tipo y dimensiones de los medidores necesarios

Aquí debe considerarse que, entre más grande sea el número de medidores mayor será la cantidad de instrumentos y/o personal requeridos para el registro y manejo de los datos.

MACROMEDICIÓN

Los datos más importantes de cada unidad operacional, UO, son

- Los relacionados con la infraestructura: datos de las tuberías, localización referenciada, material, diámetro, longitud, espesor de las paredes o clase, antigüedad, estado físico y elementos o accesorios conectados en sus extremos
- Los relacionados con la forma en que es operada cada UO: presión de trabajo, velocidad y dirección del flujo, trancos en almacenamientos, demandas estandarizadas y su variación horaria. Si no se tiene información o si no es confiable, para obtener estos datos se pueden realizar aforos con un tubo de Pitot o con otros instrumentos y métodos, de acuerdo con los límites de aplicación de cada uno

MACROMEDICIÓN

¿Cuáles son las prioridades en la macromedición?

Lo mínimo indispensable que debe haber en un sistema de abastecimiento de agua, son medidores para determinar lo siguiente:

- a) El volumen de agua producido por el conjunto de las fuentes
- b) El volumen abastecido en las entradas principales de la red de distribución.
- c) El volumen de consumo en sectores críticos de la red
- d) El volumen en los tanques de almacenamiento
- e) El caudal de las aguas residuales

¿Dónde se deben instalar macromedidores?

En un sistema de agua potable, para realizar balances de agua, se requiere controlar los volúmenes que entran, los que salen y los almacenados, estos volúmenes se determinan midiendo en la entrada y la salida de cada UO

MACROMEDICIÓN

Para minimizar los costos del sistema de macromedición se deberá evitar el uso de medidores permanentes en unidades que tienen un funcionamiento continuo y uniforme, ya que, los medidores con un rango estrecho de medición, y un grado de exactitud aceptable, son menos costosos

Nivel deseable y nivel mínimo

Los conceptos de nivel deseable y nivel mínimo de medición en un sistema de agua y saneamiento, son necesarios para analizar si el proyecto de macromedición que se desea implantar puede lograr los objetivos previstos, pero minimizando la inversión económica y los costos de operación y mantenimiento

Simbología de equipos de medición y de unidades operacionales

Medidor permanente de caudal

Medidor No permanente de caudal

Medidor permanente de presión

Medidor permanente de nivel

Medidor No permanente de nivel

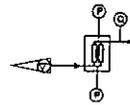
MACROMEDICIÓN

Entonces, el nivel deseable de medición es aquel que permite lograr integralmente todos los objetivos de la macromedición

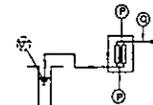
Por otra parte, aunque no haya restricciones de tipo económico o de recursos técnicos o humanos, es recomendable que el proyecto de macromedición empiece por instalar el nivel mínimo deseable

El nivel mínimo de medición es aquel que permite alcanzar los objetivos prioritarios o indispensables de la macromedición y que sean compatibles con los recursos gerenciales, administrativos y técnicos disponibles en la empresa. En este caso el proyecto debe incluir el planteamiento de una propuesta para llegar al perfeccionamiento y evolución del sistema en etapas posteriores.

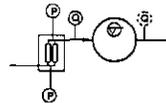
Esquemas de Medición a Nivel Deseable en Unidades Operacionales



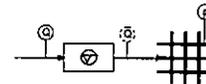
(a) Fuente superficial con bombeo



(b) Pozo con bombeo



(c) Bombeo a tanque elevado



(f) Tanque superficial a red

Esquemas de Medición

Sistema mínimo

Sistema deseable

Lectura y registro de datos

- Los equipos de macromedición proveen de información a partir de elementos primarios y secundarios
- Los elementos primarios convierten la energía cinética del agua en energía mecánica o en eléctrica que es proporcional al caudal
- Si dicho cambio es enviado como una señal acondicionada a un sistema analógico o a un sistema digital, esta debe ser convertida o adecuada de modo que tenga suficiente energía como para que pueda ser almacenada por el equipo receptor, este último puede ser de tipo indicador, controlador, registrador gráfico o la entrada a un sistema de cómputo
- Un dispositivo lectura y registro de datos de macromedición sirve para acondicionar la señal del medidor primario y convertirla a una forma analógica o digital, y que es almacenada por el mismo dispositivo, por ejemplo la cápsula seca de transmisión magnética en medidores de tipo velocidad y tipo volumétrico
- Los dispositivos de lectura y registro están formados por dos componentes: un acondicionador de señal que adecua la señal del elemento primario de medición para que pueda ser leída y un registrador que almacena la información en forma analógica o digital

Esquemas de Medición

Sistema mínimo

Sistema deseable

Lectura y registro de datos

- La información obtenida se envía a un puesto de control de la operación por vía terrestre (manual), radio, teléfono, etc
- Actualmente la mayoría de los dispositivos llamados *registradores* y los *"data logger"*, tienen integrados en un solo dispositivo ambos componentes y pueden ser portátiles o fijos. Los equipos electrónicos de lectura y registro de datos o *"data logger"*, básicamente tienen las siguientes partes: fuente de poder, amplificador de señal, compensador de frecuencia, control de ganancia, convertidor de señal analógico/digital y chip de memoria o una Unidad Central de Procesamiento (CPU)
- En relación con lo anterior y debido a que hay muchas aplicaciones para cada tipo de elemento primario, la industria de la instrumentación ha definido como *estándar* que la *señal de salida* de los sensores primarios, del equipo acondicionador de señal o del equipo registrador, debe ser de 4-20 mA DC (milamperes de corriente directa), o bien, para una salida de voltaje es de 1-5 V DC (volts de corriente directa), y una resistencia de 250 ohms

Sistema de lectura y transmisión de datos

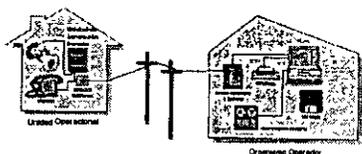
- Se le llama sistema de lectura y transmisión de datos, al conjunto de dispositivos que se emplean para adecuar, registrar y enviar, datos de los volúmenes de producción, conducción, distribución y depuración del agua, desde los elementos primarios de medición hasta los puestos de operación y control
- Este sistema esta formado por una etapa de lectura y una de transmisión. La primera etapa es un sistema de lectura y registro digital, y la etapa de transmisión, es un equipo de telemetría que puede ser radio FM, microondas, fibra optica o línea telefónica, para enviar los datos hasta un puesto de control de la operación

Sistema de Información

- La información registrada se debe procesar para elaborar reportes y divulgarlos entre las diferentes áreas responsables de la operación, mantenimiento y administración del organismo operador, esto se lleva a cabo mediante un *sistema de información*, que es el conjunto de equipos y procedimientos utilizados para organizar, clasificar y divulgar la información generada por el sistema de macromedición. Abarca las siguientes fases



Sistema de lectura y transmisión de datos



Entradas al Sistema de Información

- La recolección de datos de campo se realiza por medio de un sistema de lectura y registro o bien, con un sistema de lectura y transmisión
- Cuando la lectura y el registro se realizan por medios manuales, se emplean formularios, donde se anota toda la información de cada unidad operativa, pero cuando se realiza en forma automática se emplea un equipo de lectura y registro analógico/digital.
- Posteriormente, la información se recibe en un puesto central donde, con un sistema de información, se leen los datos, se elaboran reportes y se divulgan entre las diversas unidades responsables del organismo operador
- Los formularios que se utilizan en un sistema de información operacional son de varios tipos
- Según la forma de llenado Manual o Automática
- Según la duración Horario, Diario, Semanal, Quincenal, Mensual o Anual

Entradas al Sistema de Información

- Según la cantidad: Individuales, uno para cada unidad, operacional colectivo, uno para un grupo de unidades operacionales.
- Según la frecuencia, Una vez por hora, Una vez por día
- El tipo de formulario que se debe adoptar estará definido por las características de cada Sistema, bajo los aspectos de tamaño y complejidad que estén debidamente justificados
- En los formularios debe aparecer el código de la unidad a la que pertenece y cuyos datos están debidamente registrados y archivados, el nombre del responsable de levantar la información, y el estado general de cada elemento existente en la unidad
- Para el uso de los formularios debe existir un manual de llenado y es indispensable que el personal reciba la capacitación correspondiente para este fin

Procesamiento de datos

- Los reportes se elaboran para el análisis de los siguientes aspectos
 - ▢ Control de pérdidas
 - ▢ Uso eficiente de la energía eléctrica
 - ▢ Prevención de emergencias
 - ▢ Control de la macromedición
 - ▢ Pago de los derechos de uso del agua
 - ▢ Control de la demanda
 - ▢ Controlar el funcionamiento del sistema
 - ▢ Planeación y programación de actividades de mantenimiento
 - ▢ Evaluación de esquemas tarifarios
 - ▢ Planes de ampliación y modernización del sistema
 - ▢ Indicadores de eficiencia

Procesamiento de datos

- Este concepto se refiere a la organización y clasificación de la información que se recibe como entradas, por lo cual se debe diseñar un banco de datos que permita un manejo ágil de la información para la etapa de elaboración de reportes. Las principales etapas del procesamiento de datos son:



Salidas

- En esta etapa la información procesada se presenta en forma de gráficas y reportes que deben llegar con oportunidad a las áreas de operación, mantenimiento, administración y gerencia. La información de salida se clasifica en tres niveles
 - Primer nivel: está integrado por los reportes rutinarios de la producción, por zonas de abastecimiento, regiones o tipos de captación
 - Segundo nivel: corresponde a informes específicos más elaborados y son utilizados para el desarrollo de programas como pueden ser: uso eficiente del agua, micromedición, mejoramiento de la recaudación, redistribución de caudales, etc.
 - Tercer nivel: son reportes destinados a la gerencia y deben ofrecer elementos de juicio e indicadores de desempeño para la toma de decisiones de alto nivel.

Reducción de Pérdidas y Uso Eficiente

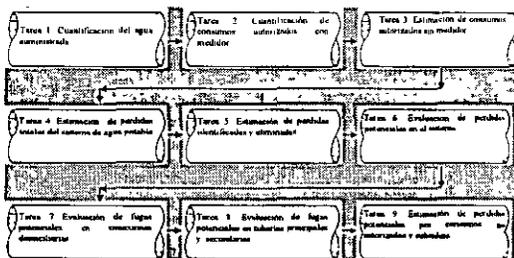
- ANTES DE INICIAR
- Establecer una hoja de trabajo
- Definir el periodo de análisis
- Elegir una unidad de medida



EL BALANCE DE AGUA

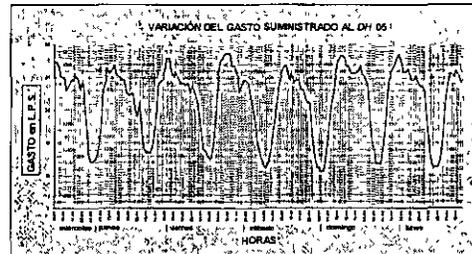
- La evaluación de fugas en la red de distribución se realiza mediante el estudio de las pérdidas que ocurren en sectores de la red denominados distintos hidrométricos, DH.
- Un distrito hidrométrico es un sector de la red de distribución, que puede funcionar teniendo un solo punto de abastecimiento y sin ninguna salida para abastecer a otros sectores de la red, esto se hace con el fin de realizar estudios de consumo y detección de pérdidas por fugas.
- Los distintos hidrométricos se pueden encontrar de manera natural en los límites de la red, o bien, se pueden delimitar mediante el cierre de válvulas de seccionamiento alrededor de una zona bien definida, la cual como ya se dijo, es abastecida con una sola tubería, las salidas de caudal son generadas por la demanda dentro de la misma zona, la cual está conformada por la suma de los consumos domiciliarios, fugas existentes en tomas domiciliarias, fugas en la red y por las conexiones no autorizadas.

EL BALANCE DE AGUA



EL BALANCE DE AGUA

- La medición global del consumo se realiza preferentemente utilizando el tubo Pitot Simplex con registrador gráfico, instalado sobre la tubería de abastecimiento al DH. Una vez instalado el equipo, se realizan mediciones continuas de 24 horas. Se muestra un ejemplo del tipo de registro que se obtiene al medir el caudal suministrado a un distrito hidrométrico.



EL BALANCE DE AGUA

■ A partir de las curvas de consumo, para definir las pérdidas por fugas de agua potable en distintos hidrométricos, se calculan los siguientes los índices

$$CHP = \frac{CT}{24} \quad ICH_{MAX} = \frac{CH_{MAX}}{CHP} \quad ICMN = \frac{CMN_h}{CHP} \quad CEP = \frac{CHP}{36L}$$

■ donde

CT es el volumen total de agua promedio que entró al distrito hidrométrico en un periodo de 24 horas, en m³

CHP es el consumo horario promedio semanal en el distrito hidrométrico, en m³/h.

CHMAX es el consumo horario máximo promedio semanal en el distrito hidrométrico, en m³/h.

ICHMAX es el índice de consumo horario máximo diario en el distrito hidrométrico

CMN_h es el consumo horario mínimo nocturno promedio en el distrito hidrométrico, en m³/h

ICMN es el índice de consumo mínimo nocturno en el distrito hidrométrico

L es la longitud total de la red de distribución del distrito hidrométrico, en km

CEP es el consumo específico promedio en el distrito hidrométrico, en litros/keg/km

EL BALANCE DE AGUA

■ Si se trata de controlar fugas sin el adecuado manejo de presiones, equivale a producir una presión estática de altura H, excesiva y que puede romper el sistema por la parte más débil

■ Por lo tanto, el control de fugas sin manejo adecuado de presiones es totalmente inútil y aún contraproducente