

**DISEÑO DE PROYECTOS DE LABORATORIO PARA EL CURSO  
FM 402 MECÁNICA DE FLUIDOS 2**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



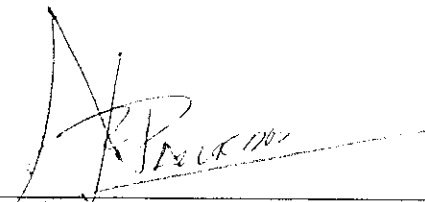
**DISEÑO DE PROYECTOS DE LABORATORIO PARA EL CURSO  
FM 402 MECÁNICA DE FLUIDOS 2**



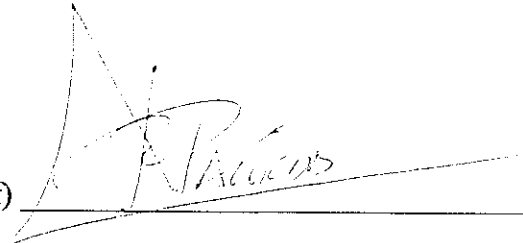
**Trabajo de graduación presentado por  
Juan Fernando Rodas Córdón  
para optar al título  
de Ingeniero Mecánico, en el grado de Licenciado.**

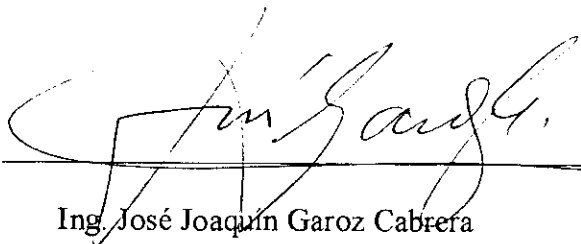
**GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2002**

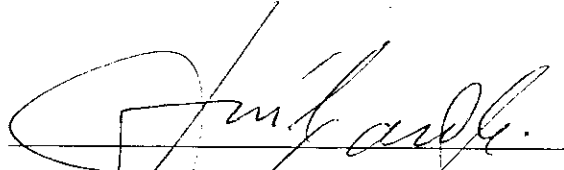
Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Carlos Roberto Paredes de la Vega  
Asesor

Tribunal:

(f)   
Ing. Carlos Roberto Paredes de la Vega

(f)   
Ing. José Joaquín Garoz Cabrefa

(f)   
Por: Ing. Sigurd Moglebust Chia  
(En Ausencia)

Fecha de Aprobación:

14 de Mayo del 2003

## **DEDICATORIA**

DEDICO ESTE TRABAJO DE GRADUACIÓN:

A mis padres Ricardo y Beatriz.

A mi hermano Ricardo.

A mis abuelos Humberto, Sara y Elisa.

A mi familia y amigos.

## **RESUMEN**

Debido a la falta de guías para los laboratorios de mecánica de fluidos se decide realizar cuatro proyectos que ayuden a facilitar el entendimiento de la teoría de los fluidos.

Los cuatro proyectos son un sistema de medición de flujo, un análisis de una bomba hidráulica, un sistema de flujo en canal abierto y la construcción de una turbina Pelton a escala.

La importancia de la medición de flujos surge de la necesidad de poder contabilizar de una manera exacta y precisa fluidos que usamos en la industria y en muchos aspectos de nuestras vidas. Por medio de un medidor de orificio se logró cuantificar el fluido por medio de variar diámetros de paso.

Por medio de la medición de la cabeza total y el flujo de una bomba se pudo analizar y obtener curvas características de su funcionamiento.

Con un sistema de flujo en canal abierto se pueden analizar, con exactitud, fenómenos como el salto hidráulico, el flujo sobre protuberancias y el flujo sobre vertederos.

Con la construcción de una turbina Pelton se pueden demostrar conceptos básicos en el funcionamiento de turbinas y la generación de energía eléctrica.

Los resultados que se obtienen con los cuatro proyectos cumplen con la función principal de ayudar al estudiante a entender mejor los conceptos de la mecánica de fluidos.

## ÍNDICE

	Página
Resumen	v
Lista de cuadros, figuras y gráficas	vii
Capítulo	
I. Introducción	1
II. Objetivos	3
III. Medición de flujo	4
IV. Análisis de una bomba	19
V. Flujo en canal abierto	36
VI. Turbinas Pelton	58
VII. Discusión	68
VIII. Conclusión	71
IX. Bibliografía	72

## LISTA DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICAS

Cuadros	Página
1. Posiciones de ramificaciones	10
2. Diámetros, radios y áreas de tubería	15
3. Relaciones de áreas	16
4. Relaciones de diámetros	16
5. Diferencias de alturas	16
6. Caudal	17
7. Caudal	18
8. Caudal	18
9. Cabeza total, capacidad y capacidad proyectada	35
10. Coeficientes de fricción	42
Figuras	
1. Tubo Ventura	5
2. Curva coeficiente descarga y número Reynolds	6
3. Boquilla de flujo	8
4. Curva coeficiente descarga y número Reynolds	8
5. Medidor de orificio	9
6. Curva coeficiente descarga y número Reynolds	11
7. Medidor de orificio	12
8. Curva coeficiente descarga y número Reynolds	12
9. Sistema de medición de orificio	14
10. Bomba de engrane	21
11. Bomba de pistón	21
12. Bomba de paletas	22
13. Bomba de tornillo	23
14. Bomba de lóbulo	24
15. Bomba de pistón	24
16. Bomba de diafragma	25

17. Bomba cinética	26
18. Bomba reciprocante	28
19. Bomba rotatoria	29
20. Cabeza total y capacidad bomba centrífuga	30
21. Eficiencia y capacidad de la bomba	31
22. Sistema de bomba	33
23. Radio hidráulico	36
24. Canal	37
25. Condiciones para flujo variable	38
26. Flujo en canal	41
27. Análisis de flujo canal abierto	43
28. Energía específica y profanidad de fluido	46
29. Profundidad críticas y alterna	47
30. Salto hidráulico	48
31. Salto hidráulico y energía específica	49
32. Flujo sobre una protuberancia	49
33. Vertederos	51
34. Geometrías de vertederos	51
35. Salto hidráulico	53
36. Canal abierto	54
37. Perfil de canal	55
38. Turbina Pelton	60
39. Turbina Pelton de cuatro chorros	61
40. Geometría de cucharas	65

#### Gráficas

1. Curva de funcionamiento para una bomba centrífuga	35
--	----

## I. INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos se refiere al estudio del comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento. Los fluidos pueden ser líquidos como el agua, aceite o gasolina, y gases como el aire, oxígeno o el nitrógeno.

El comportamiento de los fluidos afecta la vida diaria las personas. Cuando se abre un chorro de agua, ésta nos llega a través de un sistema de distribución que incluye bombas, válvulas y tubos. La fuente del agua puede ser un tanque de almacenamiento, una presa, un río, un lago o un pozo. El flujo del agua desde su fuente hasta el chorro está controlado por los principios de la mecánica de fluidos.

Para quienes estudian alguna Ingeniería, y principalmente la Ingeniería Mecánica, la mecánica de fluidos es básica y extremadamente importante. Su importancia recae, entre otras cosas, en la aplicación práctica que se le puede dar a la teoría de la mecánica de fluidos. Por ejemplo: la mecánica abarca temas como la potencia de fluido, calentamiento, ventilación y aire acondicionado. En el campo de la química se incluyen el flujo en sistema de procesamiento de materiales. En los campos civil y ambiental se tienen aplicaciones en sistemas de agua y de desechos de agua, sistemas de almacenamiento de fluidos y de distribución, y flujo en canales abiertos.

Este proyecto pretende ser una guía para el desarrollo de sistemas prácticos que ayuden al estudiante de Mecánica de Fluidos 2 a comprender mejor la teoría aprendida y aplicar sus conocimientos en simulaciones de casos reales. La idea es construir modelos simplificados a escala de sistemas y analizarlos para poder obtener su rendimiento y otras características propias de los sistemas de agua.

Los proyectos planteados son cuatro. El primer proyecto es la construcción de un sistema de medición de flujo. Esto se logrará con la variación de secciones transversales y la utilización de manómetros convencionales.

El segundo proyecto es el análisis de una bomba hidráulica . Se tocan temas como los parámetros implicados en la selección de una bomba, los tipos de bombas y otros.

El tercero es un sistema de flujo en canal abierto. Se tocan temas como las características de los canales abiertos, flujo sobre una protuberancia, flujo a través de una compuerta de esclusa, el salto hidráulico y la altura de la cresta.

Por último, el cuarto proyecto, es la construcción de una pequeña turbina tipo Pelton. Una turbina tipo Pelton tiene un funcionamiento bastante sencillo y es utilizada para caídas grandes y caudales pequeños. Estas convierten la energía cinética del agua en mecánica en el eje de la turbina. En el proyecto se conectará un dinamo simple a la turbina como generador de energía.

## **II. OBJETIVOS**

### **A. Objetivos generales:**

1. Crear una guía práctica de laboratorios para la clase de Mecánica de Fluidos.
2. Ayudar a la creación del laboratorio de Mecánica de Fluidos 2 y facilitar el éxito y la aceptación de este entre los estudiantes.
3. Detallar los pasos para la realización de los cuatro proyectos de una forma clara y fácil de entender.
4. Demostrar la importancia y la necesidad de la realización de proyectos prácticos como complemento del aprendizaje de la teoría de la Mecánica de Fluidos 2 y en general para cualquier clase cursada por los estudiantes de ingeniería mecánica.

### **B. Objetivos específicos:**

1. Utilizar los métodos de análisis del flujo en canal abierto para estudiar en un caso real las características del mismo.
2. Construir un medidor de fluidos a partir de variaciones de área de paso del fluido y la utilización del manómetro.
3. Servir como una guía práctica para el análisis, selección y aplicación de bombas hidráulicas.
4. Lograr la generación de energía utilizando una turbina tipo Pelton y un dinamo como generador.

### **III. MEDICIÓN DE FLUJO**

La medición de flujo es muy importante. Tiene aplicaciones como conteo, evaluación de funcionamiento, investigación y el control de procesos. Un ejemplo muy claro donde es necesario hacer una medición del fluido es en las bombas de combustible en las gasolineras. De la misma manera se necesita hacer mediciones de fluidos en la fabricación de productos químicos. Existe una gran variedad de aparatos para la medición de flujo. Entre estos están los medidores de cabeza variable, medidores de área variable, fluxómetros de varios tipos, sondas de velocidad, anemómetros y muchos otros.

La fácil construcción y la practicidad de los medidores de cabeza variable nos hacen enfocarnos en ellos para la realización de ésta práctica.

#### **A. Medidores de cabeza variable**

Los medidores de cabeza variable se basan en que cuando una corriente de fluido es restringida, su presión disminuye por una cantidad que depende de la velocidad de flujo a través de la restricción. Por esta razón, el diferencial en la presión entre los puntos antes y después de la restricción puede utilizarse para indicar la velocidad del flujo. Las formas más comunes de medidores de cabeza variables son: tubo venturi, boquilla de flujo, orificio y tubos de flujo.

1. Tubo Venturi. En la figura 1 se muestra la apariencia de un tubo venturi. Este dispositivo fue ideado por Herschell en 1887. Lo llamó venturímetro en honor al físico italiano Venturi, que fue quien realizó los primeros experimentos que sirvieron de fundamento para su utilización. El flujo desde la tubería principal en la sección 1 se acelera a través de la parte angosta que se llama garganta, donde disminuye la presión del fluido. Después se expande el flujo a través de la porción más ancha al mismo diámetro que la tubería principal. En la pared de la tubería en la sección 1 y en la pared de la garganta, a la se le



$$v_2^2 (1 - (A_2/A_1)^2) = 2g ( (p_1 - p_2)/\gamma ) + (z_1 - z_2) - h_L )$$

$$v_2 = \text{raiz} [ (2g ( (p_1 - p_2)/\gamma ) + (z_1 - z_2) - h_L ) / (1 - (A_2/A_1)^2) ]$$

Se pueden llevar a cabo dos simplificaciones en este momento. Una es que la diferencia de elevación de  $(z_1 - z_2)$  es muy pequeña. se puede hacer inclusive cuando el medidor este instalado en forma vertical. Por esta razón se puede despreciar este término. La otra cuestión es que  $h_L$  es la pérdida de energía en el fluido conforme este corre de la sección 1 a la 2. El valor de  $h_L$  se debe determinar experimentalmente. Pero es más conveniente modificar la ecuación eliminando  $h_L$  e introduciendo un coeficiente de descarga C:

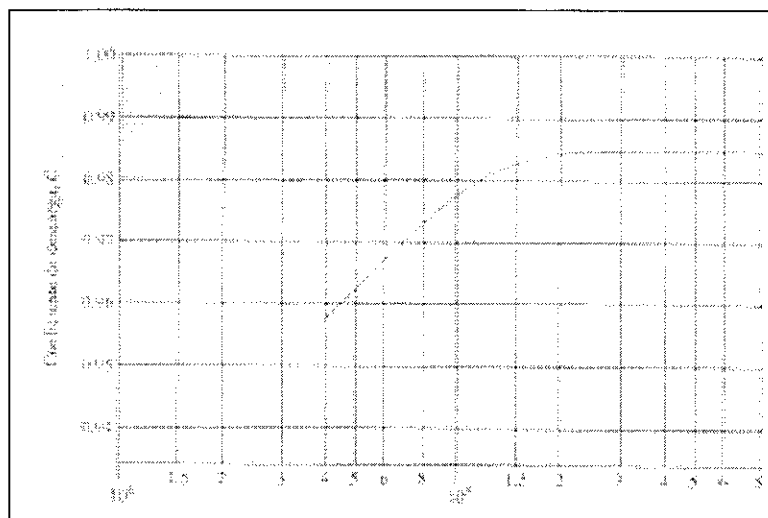
$$v_2 = C \text{ raiz} [ ( 2g(p_1 - p_2)/\gamma ) / (1 - (A_2/A_1)^2) ]$$

Esta ecuación puede utilizarse para calcular la velocidad de flujo en la garganta del medidor. Sin embargo, usualmente se desea calcular la velocidad de flujo de volumen.

Puesto que  $Q = A_2 v_2$ , se tiene,

$$Q = C A_2 \text{ raiz} [ ( 2g(p_1 - p_2)/\gamma ) / (1 - (A_2/A_1)^2) ]$$

**Figura 2 Curva coeficiente descarga y número de Reynolds**



El valor del coeficiente  $C$  depende del número de Reynolds del flujo y de la geometría del medidor. En la figura 2 se muestra una curva típica de  $C$  contra número de Reynolds en la tubería principal.

Se pueden recomendar que  $C = 0.984$  para un tubo venturi fabricado o fundido con las siguientes condiciones:

$$100 \text{ mm} \leq D \leq 1200 \text{ mm}$$

$$4 \text{ pulg.} \leq D \leq 48 \text{ pulg.}$$

$$0.30 \leq \beta \leq 0.75$$

$$2 \cdot 10^5 \leq N_R \leq 6 \cdot 10^6 \quad (\text{en la tubería principal})$$

en donde  $\beta$  se define como el cociente del diámetro de la garganta y el diámetro de la sección de la tubería principal. Ésto es  $\beta = d/D$ .

Cuando un tubo es maquinado, se recomienda que  $C = 0.005$  para las condiciones siguientes.

$$50 \text{ mm} \leq D \leq 250 \text{ mm}$$

$$2 \text{ pulg.} \leq D \leq 10 \text{ pulg.}$$

$$0.30 \leq \beta \leq 0.75$$

$$2 \cdot 10^5 \leq N_R \leq 6 \cdot 10^6 \quad (\text{en la tubería principal})$$

La ecuación descrita se utiliza para la boquilla de flujo, para el orificio y el tubo venturi.

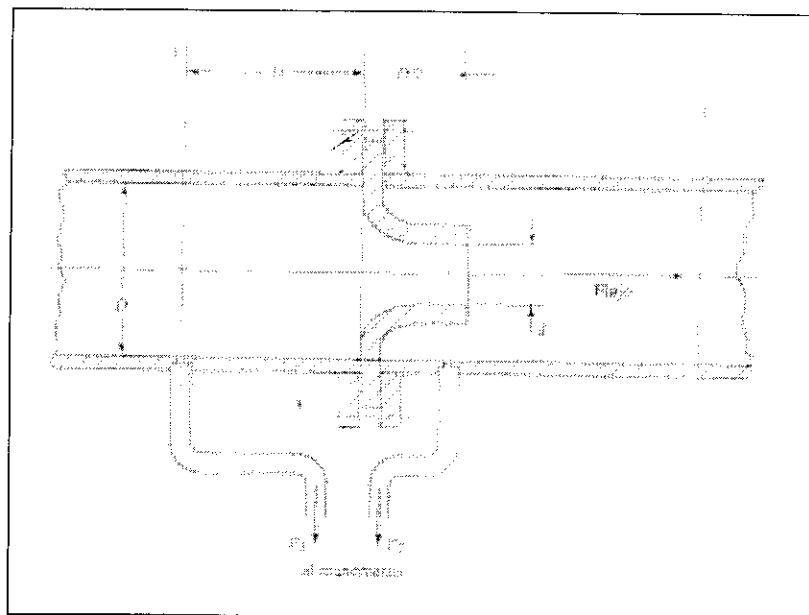
2. Boquilla de flujo. La boquilla de flujo es una contracción gradual en el área de paso del flujo. Después de esta contracción gradual sigue una figura cilíndrica recta como se muestra en la figura 3. Debido al tipo de contracción en la boquilla, existe una pérdida muy pequeña entre los puntos 1 y 2. En la figura 4 se muestra una curva típica de  $C$  versus número de Reynolds. En valores grandes de número de Reynolds,  $C$  es superior a 0.99. Cuando los valores de número de Reynolds son bajos, la expansión repentina fuera de la garganta de la boquilla provoca una pérdida de energía mayor y un valor de  $C$  más bajo.

Se puede utilizar la siguiente ecuación para C:

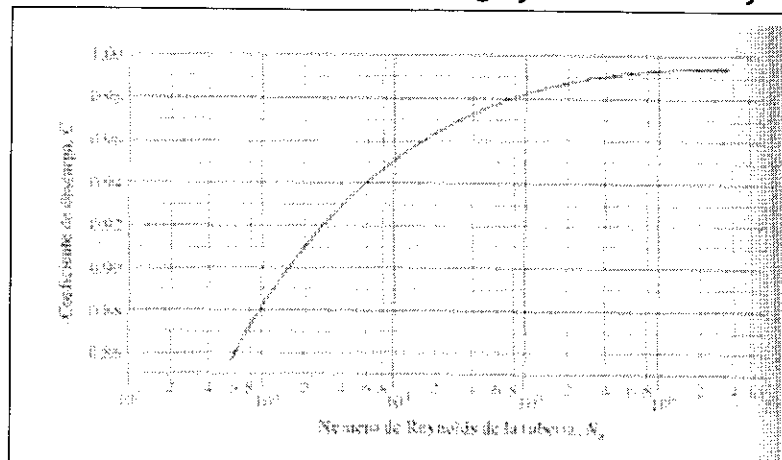
$$C = 0.9975 - 0.00653(106/N_R)^a$$

Donde  $a = 0.5$  para números de Reynolds menores a 106 y  $a = 0.2$  para números más grandes. El número de Reynolds está basado en el diámetro de la garganta de la boquilla.

**Figura 3 Boquilla de flujo**



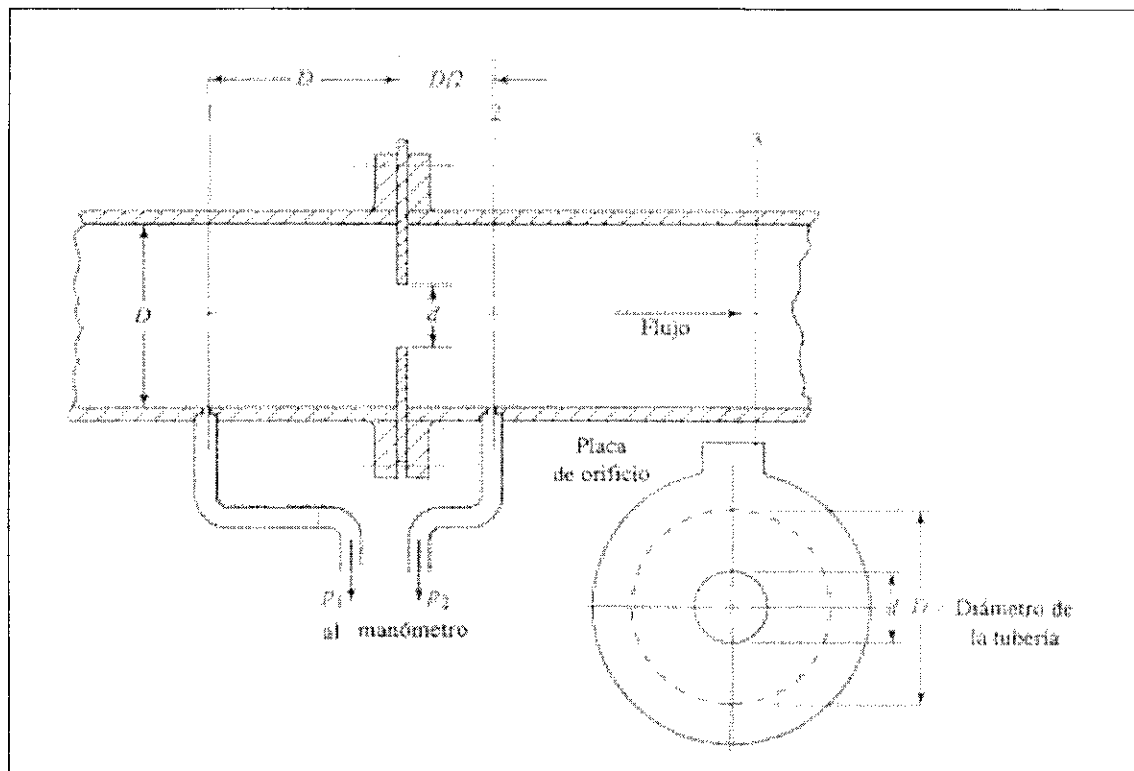
**Figura 4 Curva Coeficiente descarga y número de Reynolds**



3. Medidor de orificio. Un orificio es una placa plana con un orificio de orilla en ángulo. Al colocar esta placa dentro de una tubería, ésta provoca que el flujo se contraiga de repente conforme se aproxima al orificio y después se expanda al diámetro total de la tubería. En la figura 5 se puede ver un medidor de orificio. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta. La rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio. Los ramificadores de presión que están colocados antes y después del orificio permiten la medición de la presión diferencial a través del medidor, la cual está relacionada con la velocidad de flujo de volumen.

En el caso de un medidor de orificio, el valor real del coeficiente de descarga  $C$  depende de la ubicación de las ramificaciones de presión. Tres posibles ubicaciones se listan en la cuadro 1.

**Figura 5 Medidor de orificio**



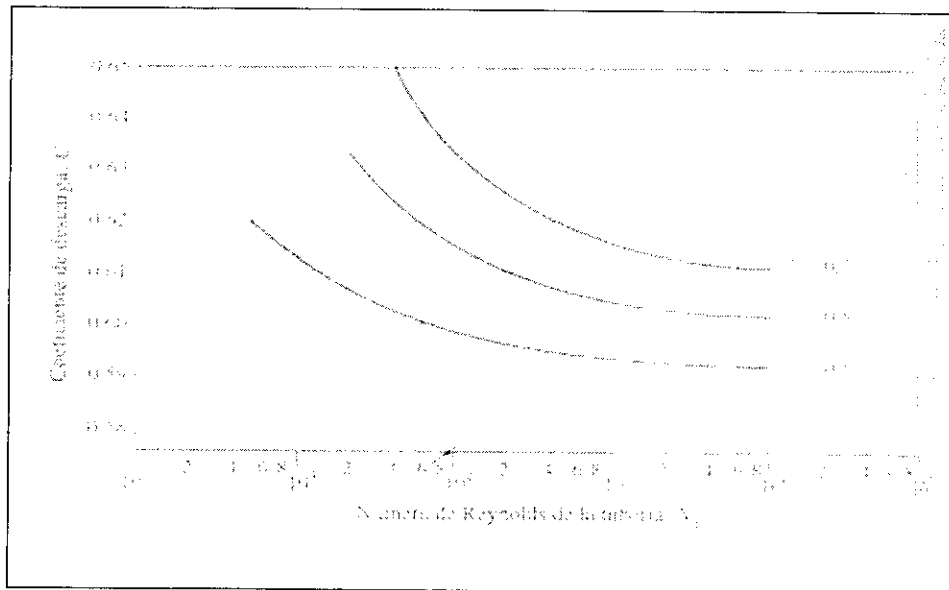
El valor de  $C$  también se ve afectado por pequeñas variaciones en la geometría de la orilla del orificio. Las curvas típicas de los orificios de orilla se muestran en la figura 6. En este caso  $D$  es el diámetro de la tubería y  $d$  es el diámetro del

orificio. En este caso el valor de  $C$  es mucho más bajo que el tubo venturi o la boquilla de flujo puesto que el fluido se fuerza a realizar una contracción repentina seguida de una expansión repentina. De la misma manera, debido a que las mediciones están basadas en el diámetro del orificio, la disminución en el diámetro de la corriente de flujo en la ven contracta tiende a reducir el valor de  $C$ . En el caso de un medidor de orificio, el valor real del coeficiente de descarga  $C$  depende de la ubicación de las ramificaciones de presión. Tres posibles ubicaciones se listan en el cuadro 1. El valor de  $C$  también se ve afectado por pequeñas variaciones en la geometría de la orilla del orificio. Las curvas típicas de los orificios de orilla se muestran en la figura 6. En este caso  $D$  es el diámetro de la tubería y  $d$  es el diámetro del orificio. En este caso el valor de  $C$  es mucho más bajo que el tubo venturi o la boquilla de flujo puesto que el fluido se fuerza a realizar una contracción repentina seguida de una expansión repentina. De la misma manera, debido a que las mediciones están basadas en el diámetro del orificio, la disminución en el diámetro de la corriente de flujo en la ven contracta tiende a reducir el valor de  $C$ .

**Cuadro 1 Posiciones de ramificaciones de presión**

<b>Ramificador de presión de entrada <math>p_1</math></b>	<b>Ramificador de presión de entrada <math>p_2</math></b>
<b>1</b> Un diámetro de tubería hacia Arriba de la placa	Medio diámetro de tubería hacia Debajo de la cara de entrada De la placa
<b>2</b> Un diámetro de tubería hacia Arriba de la placa	En la vena contracta
<b>3</b> Un borde, 1 pulg. hacia arriba De la placa	Un borde, 1 pulg. hacia debajo de la cara de salida de la placa

Figura 6 Curva coeficiente descarga y número de Reynolds



## B. Práctica 1: Mediciones de flujo

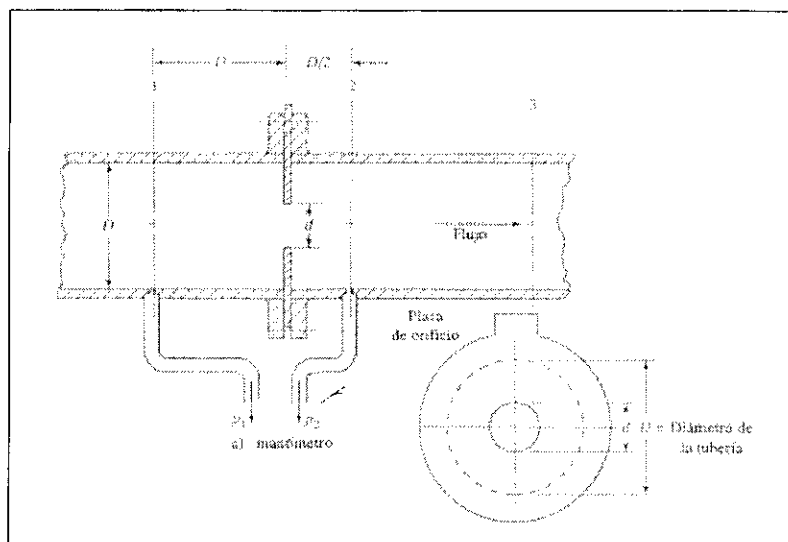
Las cuatro razones primordiales para utilizar sistemas de medición de flujo son el conteo, la evaluación del funcionamiento, la investigación y el control de procesos. Entre los medidores de caudal están los medidores de cabeza variable. El principio básico en el cual se basan los medidores de cabeza variable es que cuando una corriente de fluido se restringe, su presión disminuye por una cantidad que depende de la velocidad de flujo a través de la restricción. Por lo tanto, la diferencia de presión entre los puntos antes y después de la restricción puede utilizarse para indicar la velocidad del flujo.

Como se demostró en la parte teórica de este trabajo, al basarse en la ecuación de la energía y la continuidad se obtiene la siguiente ecuación para describir un medidor de cabeza variable:

$$Q = CA_2 \text{ raíz} [ ( 2g(p_1-p_2)/\gamma ) / ( (1 - (A_2/A_1)^2 ) ) ]$$

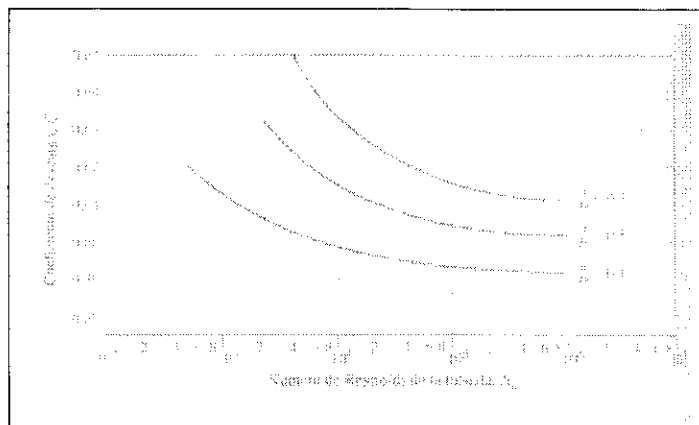
La ecuación se refiere a un sistema como se muestra en la figura 1. En la ecuación,  $A_1$  y  $A_2$  se refieren al área de  $D$  y  $d$  respectivamente,  $p_1$  y  $p_2$  son relativos a la presión que se presenta en el manómetro.

**Figura 7 Medidor de orificio**



En el caso específico del medidor de orificio,  $C$ , que es un coeficiente que depende del número de Reynolds del flujo y de la geometría real del medidor se obtiene basándonos en la figura 8. Esta gráfica nos relaciona Número de Reynold, el cociente de  $d/D$  y el coeficiente de descarga.

**Figura 8 Curva coeficiente descarga y número de Reynolds**



A partir de la ecuación previamente descrita y la gráfica 1, debe de ser posible hallar el caudal usando un medidor de orificio.

1. Objetivo. Se trata de hallar el caudal de líquido que pasa por una tubería forzada mediante la utilización de un medidor de orificio y un manómetro diferencial convencional. El líquido que se utilizará en la práctica será agua.

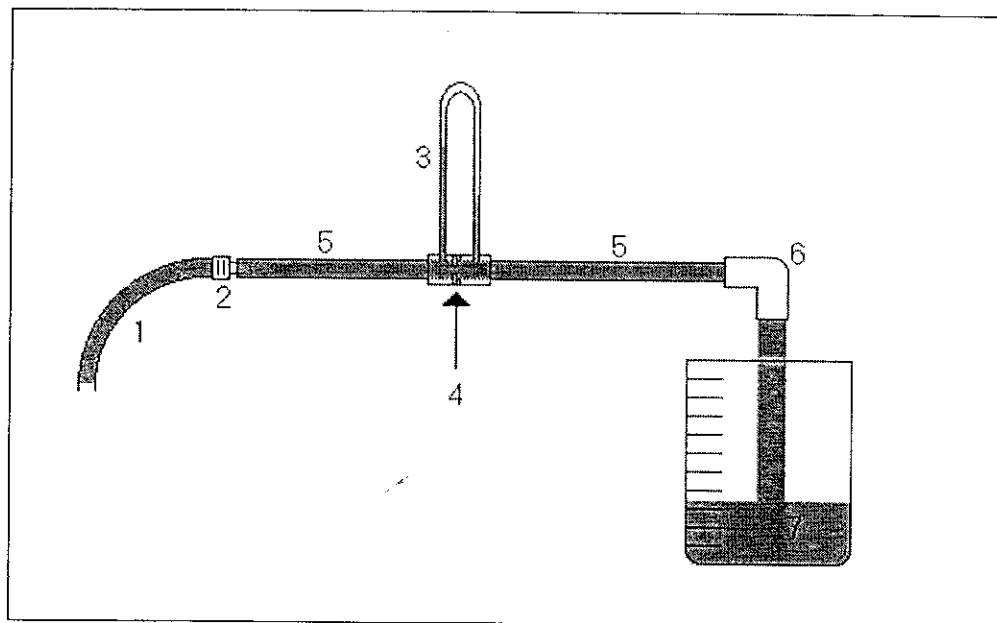
2. Materiales e instrumentos.

- Tres metros de tubería de PVC de  $\frac{1}{4}$ ".
- Dos codos a  $90^\circ$ , un tapón, y una copla para tubería de PVC de  $\frac{3}{4}$ ".
- Un metro de manguera transparente de cinco milímetros de diámetro interno.
- Cuatro discos de diámetro igual al diámetro interno de tubería de PVC de  $\frac{3}{4}$ ". (26 milímetros)
- Un barreno y brocas.
- Macho de manguera para jardín.
- Cronómetro.
- Cinta métrica.
- Una cubeta con capacidad para veinte litros graduada.

3. Procedimiento experimental. Como ya se mencionó el objeto de la práctica es medir el caudal por medio de un medidor de cabeza variable de tipo orificio. Lo primero será armar el sistema que se muestra en la siguiente figura:

1. Manguera proveniente de fuente de agua.
2. Macho roscado para adaptar manguera a tubería PVC  $\frac{3}{4}$ ".
3. Manómetro diferencial
4. Disco perforado.
5. Tubería de carga y descarga.
6. Codo a  $90^\circ$ .
7. Cubeta graduada.

**Figura 9 Sistema de medición de orificio**



Como se puede ver en la figura, la manguera está conectada a la primera sección de tubería. Lo ideal sería que esta prueba se hiciera con un sistema cerrado. Si esto no se pudiera conseguir una bomba sólo para este fin, se puede utilizar el sistema de una casa. Se tendrá que tomar en cuenta que no se encuentren otros chorros prendidos, lavamanos abiertos, lavadoras de ropa y platos fuera de funcionamiento, etc. El objetivo será no compartir el caudal que pueda producir la bomba de la casa. Se pueden hacer pruebas con la cubeta graduada y ver en cuanto tiempo se llena. Por ejemplo se puede prender el chorro durante un minuto y ver hasta dónde se llena la cubeta. Se repite la prueba y si el resultado es consistente entonces se puede decir que no hay pérdidas. Los discos deberán de ser perforados con distintas medidas. Por ejemplo 10mm, 12mm y 15mm. De esta manera se pueden hacer varias pruebas y confirmar la consistencia del resultado. Las perforaciones se hacen con el barreno y la broca. Por el diámetro interno que tiene la tubería de  $\frac{3}{4}$ " se pueden usar monedas de un quetzal ya que el diámetro casi coincide. Se acciona el caudal y se mide la diferencia de altura de la columna de agua en el manómetro. Como forma de comprobación se puede mantener el chorro abierto durante un tiempo y medir cuánto se llena la cubeta graduada. De esta manera se obtendrá el caudal real.

4. Datos y cálculos. Los siguientes datos son obtenidos utilizando los siguientes materiales y bajo las siguientes condiciones:

- Caudal del sistema: 20 L/min
- Diámetro interno de tubería PVC 26 mm.
- Diámetro de orificio en discos: 10, 12, 15 mm.
- Intervalos de accionamiento de sistema: 1 minuto.

Se parte de la siguiente ecuación:

$$Q = CA_2 \text{ raíz } [ ( 2g(p_1-p_2)/\gamma ) / ( (1 - (A_2/A_1)^2 ) ) ]$$

Además se sabe que  $\Delta p = \gamma h$ , donde h es el diferencial de la altura.

De este modo la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q = CA_2 \text{ raíz } [ ( 2gh ) / ( (1 - (A_2/A_1)^2 ) ) ]$$

De esta ecuación no se sabe, ni el valor de C y tampoco el de Q que es lo estamos buscando. Los valores de g,  $A_1$ ,  $A_2$  se saben de antemano. El valor de h es lo que se mide en la práctica. En la cuadro 2 se muestran los valores para las áreas dependiendo del diámetro de disco que se esté usando.

**Cuadro 2 Diámetros, radios y áreas de tubería**

No.	Diámetro m	Radio m	Area M <sup>2</sup>
A <sub>1</sub>	0.026000	0.013000	0.000531
A <sub>21</sub>	0.015000	0.007500	0.000177
A <sub>22</sub>	0.012000	0.006000	0.000113
A <sub>23</sub>	0.010000	0.005000	0.000079

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Las relaciones entre  $A_2/A_1$  y d/D son las siguientes:

**Cuadro 3 Relaciones de áreas**

$A_{21}/A_1$	0.33284
$A_{22}/A_1$	0.21381
$A_{23}/A_1$	0.14877

**Cuadro 4 Relaciones de diámetros**

$d_1/D$	0.576923
$d_2/D$	0.461538
$d_3/D$	0.38462

Las diferencia de alturas obtenidas en la práctica fueron las siguientes:

**Cuadro 5 Diferencias de alturas**

$d = 15 \text{ mm}$	0.18
$d = 12 \text{ mm}$	0.60
$d = 10 \text{ mm}$	1.20

Se harán los cálculos para el  $d_{22} = 10 \text{ mm}$ .

Con los datos que se tienen la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q = C (0.000079\text{m}^2) \cdot \text{raiz}(2 \cdot 9.81\text{m/s}^2 \cdot 1.20\text{m} / 0.978117)$$

$$Q = C (0.000079\text{m}^2) \cdot \text{raiz}(24.070074 \text{ m/s})$$

$$Q = C \cdot 3.87 \cdot 10^{-4}$$

De esta forma se tienen dos incógnitas, el valor del caudal  $Q$ , que es lo que estamos buscando, y  $C$  que es el valor del coeficiente de descarga. El valor del coeficiente  $C$  se puede encontrar por medio del número de Reynolds y el valor de  $d/D$  por medio de la utilización de la gráfica en la figura 8. En este caso no se sabe el número de Reynolds, pero se puede asumir uno para empezar y seguir trabajando la ecuación hasta no encontrar una variación considerable. Se puede escoger un número de Reynolds de 2000, que es el límite para el flujo laminar.

Se tiene que para  $d = 10\text{mm}$  y  $D = 26\text{ mm}$ ,  $d/D = .39$ .

Al ver en la gráfica la curva para  $d/D = 0.39$  y  $NR = 2000$ , se obtiene un valor de  $C$  de  $0.62$ .

Al introducir esto en la ecuación se tiene el siguiente valor para  $Q$ ,

$$Q = 0.62 * 3.87589 * 10^{-4}$$

$$Q = 2.40305 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \text{ ( 14.41 L/min)}$$

Ahora también se sabe que el Número de Reynolds está relacionado con el diámetro  $D$ , la velocidad del flujo  $v$  y la viscosidad del fluido  $\nu$ .

$$N_R = vD/\nu.$$

Se sabe, basándose en que  $Q = vA$ , que la velocidad del flujo en el canal es de  $3.04\text{ m/s}$ . También se tiene el dato de la viscosidad del agua a temperatura ambiente ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) es de  $8.94 * 10^{-7}$ .

$$\text{Al sustituir en } N_R = (3.04\text{m/s}) * 0.010\text{m} / 8.94 * 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$$

$$N_R = 34004$$

Al utilizar este número en la gráfica de la figura 8 tenemos que  $C = 0.61$ . Este procedimiento se repite varias veces hasta que no haya variación en el resultado. A continuación se presentan los resultados para los tres casos que se hicieron en las prácticas.

Para  $d = 10\text{ mm}$  tenemos los siguientes resultados:

**Cuadro 6 Caudal**

Número Reynolds	C	Q m <sup>3</sup> /s	V m/s	Número Reynolds D*v/viscosidad
2000	0.62	0.00023994	3.03721519	33973
33973	0.61	0.00023607	2.98822785	33425
33425	0.61	0.00023607	2.98822785	33425

Esto da como resultado un caudal de  $14.39\text{ L/min}$ .

Para  $d = 12\text{ mm}$  tenemos los siguientes resultados:

**Cuadro 7 Caudal**

Número Reynolds	C	Q m <sup>3</sup> /s	V m/s	Número Reynolds D*v/viscocidad
2000	0.610	0.00024210	2.14247601	35948
35948	0.605	0.00023414	2.96373418	33151
33151	0.610	0.00023607	2.98822785	33425

Esto da como resultado un caudal de 14.39 L/min.

Para d = 15 mm tenemos los siguientes resultados:

**Cuadro 8 Caudal**

Número Reynolds	C	Q m <sup>3</sup> /s	v m/s	Número Reynolds D*v/viscocidad
2000	0.620	0.00021870	1.23558644	20731
20731	0.610	0.00023607	2.98822785	33425
33425	0.610	0.00023607	2.98822785	33425

Esto da como resultado un caudal de 14.39 L/min.

## **IV. ANÁLISIS DE UNA BOMBA**

Existe una gran variedad de bombas para transportar líquidos. Para una adecuada selección y aplicación de las bombas es muy importante conocer sus características de funcionamiento.

### **A. Parámetros implicados en la selección de un bomba**

Al momento de seleccionar una bomba para alguna aplicación en particular se deben considerar los siguientes factores:

- La naturaleza del líquido que se bombeará.
- La capacidad requerida ( velocidad de flujo de volumen )
- Las condiciones en el lado de la succión o entrada de la bomba.
- Las condiciones en el lado de la descarga o salida de la bomba.
- La cabeza total de la bomba (el término  $h_a$  de la ecuación de la energía)
- El tipo de sistema al que la bomba está entregando el fluido.
- El tipo de fuente de alimentación ( motor eléctrico, motor de diesel, turbina de vapor, etc. )
- Limitaciones de espacio, peso y posición.
- Condiciones ambientales
- Costo de la bomba y de su instalación.
- Costo de la operación de la bomba.
- Códigos y estándares que rigen a las bomba.

La naturaleza del fluido está caracterizada por su temperatura en las condiciones de bombeo, gravedad específica, viscosidad, tendencia a generar corrosión o erosión en las diferentes partes de la bomba y presión de vapor a la temperatura de bombeo. El término presión de vapor se utiliza para definir la presión en la superficie libre de un fluido debido a la formación de un vapor. La presión de vapor se eleva conforme la temperatura del líquido se eleva y es

esencial que la presión a la entrada de la bomba permanezca arriba de la presión de vapor del fluido.

Por lo regular, también es necesario especificar los siguientes puntos acerca de las bombas:

- Tipo de bomba y fabricante
- Tamaño de bomba y fabricante.
- Tamaño de la conexión de la succión y tipo ( de borde, roscada, etc. )
- Tamaño y tipo de la conexión de la descarga.
- Velocidad de operación.
- Especificaciones de alimentación ( por ejemplo: para un motor eléctrico-potencia requerida, velocidad, voltaje, fase, frecuencia, tamaño de la armazón, tipo de estructura. )
- Tipo de acoplamiento, fabricante, número de modelo.
- Características de montaje.
- Materiales y accesorios especiales que se requieran si los hay.
- Diseño del sellado de la flecha y materiales de sellado.

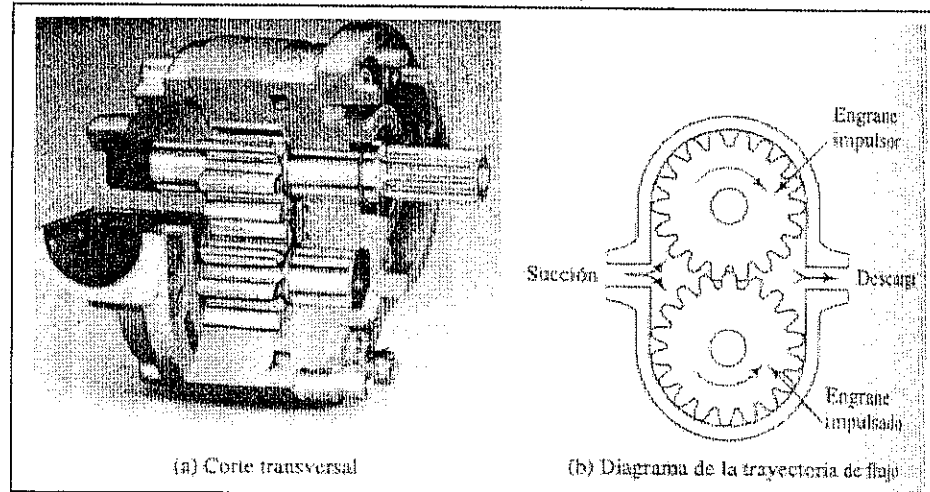
## **B. Tipos de bombas**

1. Bombas de desplazamiento positivo. Las bombas de desplazamiento positivo se caracterizan porque entregan una cantidad fija de fluido en cada vuelta del rotor de la bomba. La entrega o capacidad de una bomba de desplazamiento positivo no se ve afectada por los cambios de presión que ésta deba desarrollar, excepto por resbalamientos pequeños debido al paso libre entre el rotor y la estructura. La gran mayoría de este tipo de bombas pueden manejar líquidos altamente viscosos.

En las próximas dos figuras se muestran dos tipos de bombas de desplazamiento positivo comúnmente utilizadas en aplicaciones de potencia de fluidos. La bomba de engranes comprende dos engranes fuertemente unidos que giran en el sentido de las manecillas del reloj dentro de una estructura. La periferia externa de los dientes del engrane embona dentro de la parte interna de la estructura. El fluido se ingresa desde el depósito de alimentación en el

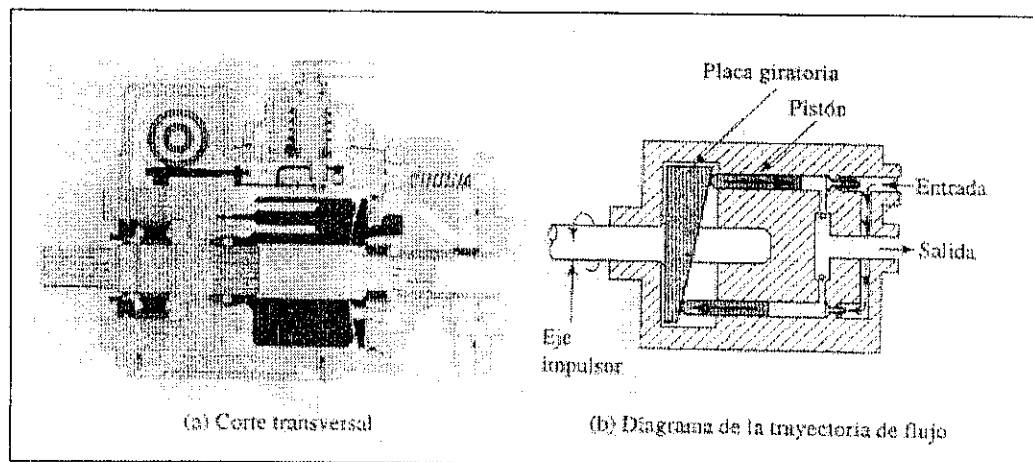
puerto de succión y se transporta por los espacios entre los dientes de los engranes al puerto de descarga, en donde se entra a alta presión al sistema.

**Figura 10 Bomba de engranes**



La presión de entrega depende de la resistencia del sistema. Las bombas de engranes desarrollan presiones en el sistema en el rango de 1500 lb/pulg<sup>2</sup> a 4000 lb/pulg<sup>2</sup> ( 10.3 Mpa hasta 27.6 Mpa). La entrega varía con el tamaño de los engranes y la velocidad rotacional, la cual puede ser de hasta 4000 rpm. Es posible tener entregas de 1 a 50 gal/min ( 4 a 190 L/min) con unidades de diferentes tamaños.

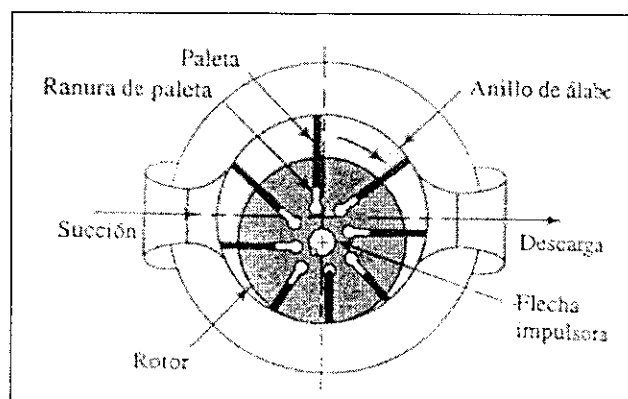
**Figura 11 Bomba de pistón**



La figura 11 muestra una bomba de pistón axial que utiliza una placa de derrame giratoria que actúa como un álabe para reciprocarse los pistones. Los pistones, en forma alternada, toman fluido en sus cilindros a través de válvulas de succión y después lo fuerzan a salir a través de las válvulas de descarga contra la presión del sistema. La entrega puede variar desde cero hasta el valor máximo, cambiando el ángulo de la placa de derrame y por ende cambiando el golpe de los pistones. La capacidad de la presión varía hasta 5000 lb/pug<sup>2</sup> (34.5 Mpa).

También utilizada para proporcionar potencia al fluido, la bomba de paletas, que se muestra en la siguiente figura consiste en un rotor excéntrico que contiene un juego de paleta deslizantes que se mueven dentro de la estructura.

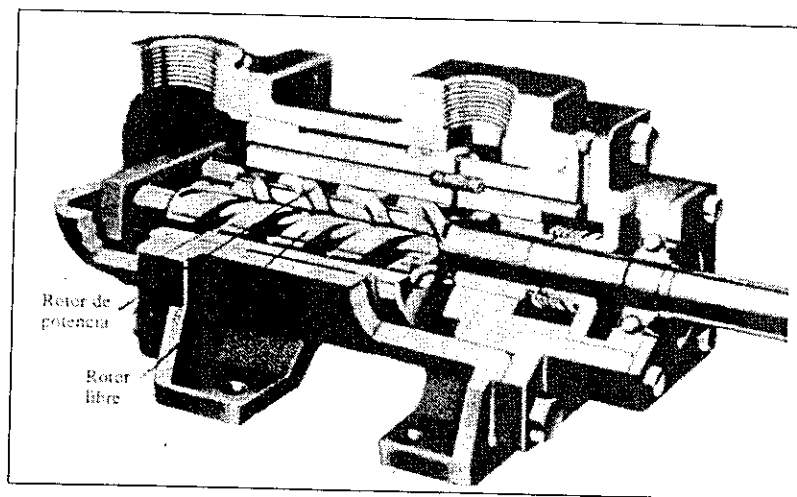
**Figura 12 Bomba de paletas**



Un anillo de álabe en la estructura controla la posición radial de las paletas. El fluido ingresa al puerto de succión a la izquierda, y después se captura en un espacio entre dos paletas consecutivas y es así transportado al puerto de descarga en el sistema de presión. Las paletas posteriormente se retraen en sus ranuras en el rotor conforme viajan de regreso al lado de entrada o de succión de la bomba. Las bombas de paleta de desplazamiento variable pueden entregar desde cero hasta la velocidad de flujo máximo variando la posición del rotor con respecto del anillo del álabe y la estructura. La forma como se selecciona la entrega variable puede ser manual, eléctrica, hidráulica o neumáticamente accionada para controlar el funcionamiento de la unidad de alimentación de fluido a las necesidades que se está manejando.

Las capacidades de presión típicas varían desde 2000 hasta 4000 lb/pulg<sup>2</sup> (13.8 hasta 27.6 Mpa). Una desventaja de las bombas de engrane, pistón y paleta es que entregan un flujo pulsante a la salida debido a que cada elemento funcional mueve un volumen fijo y cautivo de fluido de la succión hacia la descarga. Las bombas de rosca y las bombas de cavidad progresiva no tienen este problema. La siguiente figura muestra una bomba de rosca en la cual el rotor de potencia central de forma enroscada, se une fuertemente con los dos rotores libres creando una cavidad dentro de la estructura que se mueve en forma axial desde la succión hasta la descarga proporcionando un flujo uniforme y continuo.

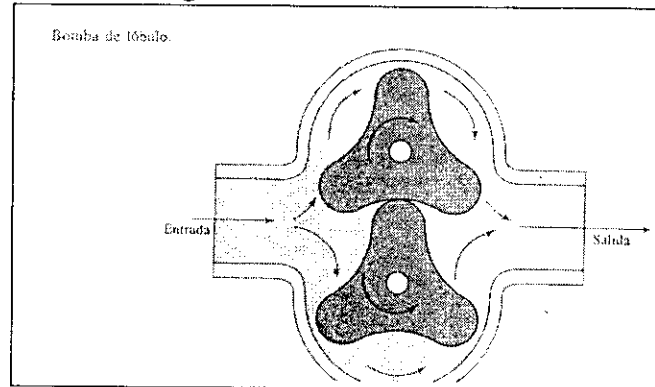
Figura 13 Bomba de tornillo



Las bombas de tornillo operan a una presión nominal de 3000 lb/pulg<sup>2</sup> (20.7 Mpa), pueden correr altas velocidades y operan de una forma más silenciosa que la mayoría de otros tipos de bombas hidráulicas.

La bomba de lóbulo, a veces llamada bomba de álabe, opera en una forma similar a la bomba de engranes. Esta bomba se muestra en la siguiente figura:

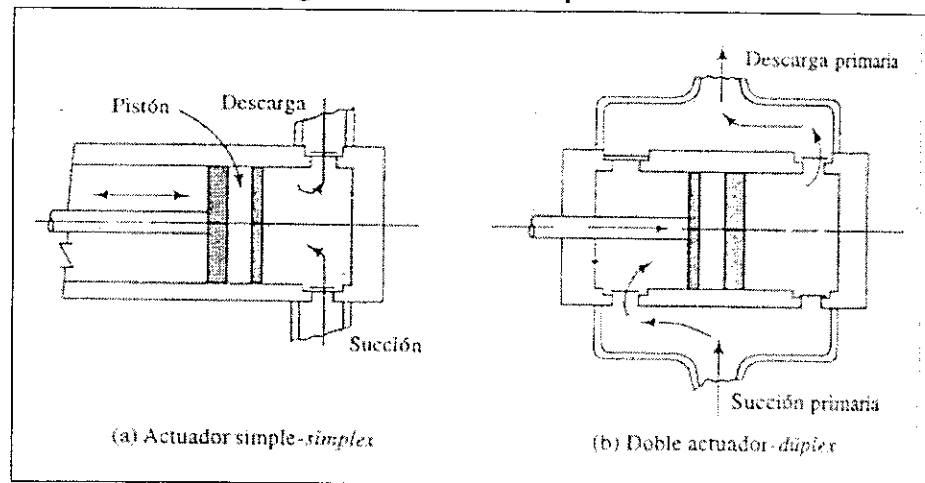
**Figura 14 Bomba de lóbulos**



Los dos rotadores que giran en el sentido de las manecillas del reloj pueden tener dos, tres o más lóbulos. El fluido es conducido a los alrededores por la cavidad que se forma entre lóbulos sucesivos.

Las bombas de pistón utilizadas en la transferencia de fluidos se clasifican tanto como de acción única, simples, o como de acción doble, duplex, como se muestra en la siguiente figura.

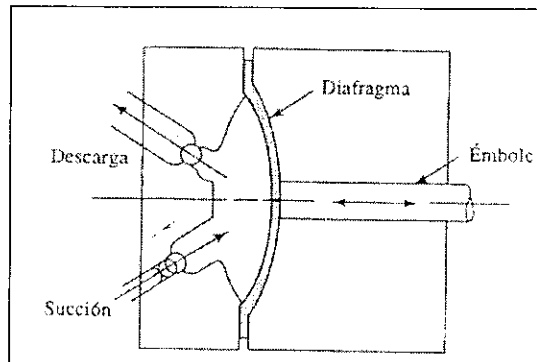
**Figura 15 Bomba de pistón**



En principio, son similares a las bombas de pistón de alimentación de fluido, pero tienen una capacidad de flujo más grande y operan a presiones menores. Asimismo, éstas se encuentran alimentadas a través de un alimentador tipo biela, en lugar de ser alimentadas por medio de la placa de derrame descrita con anterioridad.

En la bomba de diafragma que se muestra en la siguiente figura, una varilla reciprocante mueve un diafragma flexible dentro de una cavidad, descargando fluido en forma alternada conforme la varilla se mueve hacia la izquierda y tomando fluido hacia adentro conforme la varilla se mueve hacia la derecha.

**Figura 16 Bomba de diafragma**



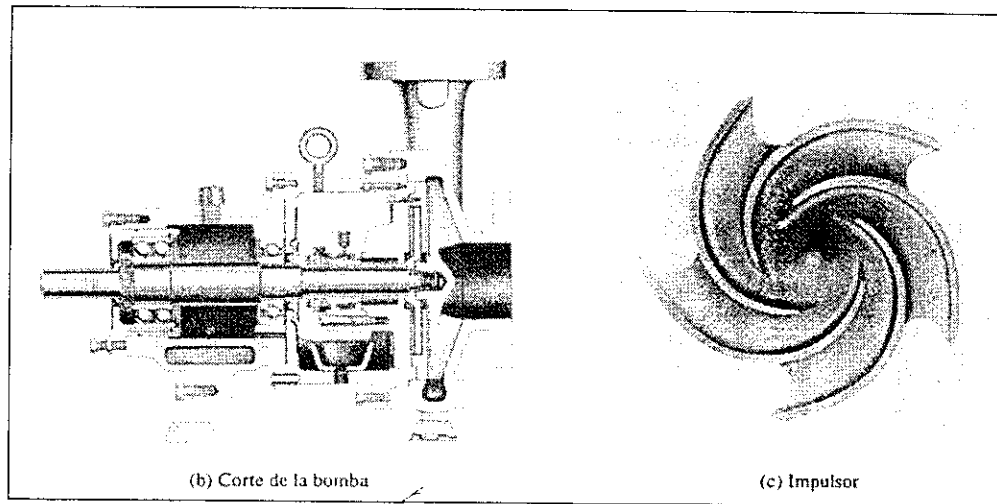
Una ventaja de este tipo de bomba es que el diafragma solamente hace contacto con el fluido eliminando la contaminación de los elementos de alimentación.

2. Bombas cinéticas. Las bombas cinéticas aceleran el fluido a través de un impulsor y por ésta acción le adicionan energía. La bomba cinética más común es la bomba centrífuga de flujo radial. En la siguiente figura se muestra la configuración de esta bomba.

El fluido entra en la parte central del impulsor y luego se lanza hacia fuera a través de las paletas. Al dejar el impulsor el fluido es frenado gradualmente por una especie de hélice en forma de espiral. Esto que provoca que parte de la energía cinética se convierta en presión de fluido.

El tipo de impulsor de una bomba de flujo axial depende de la acción hidrodinámica de las hojas impulsoras para levantar y acelerar el fluido en forma axial, a lo largo de una trayectoria paralela al eje del impulsor. La bomba de flujo mezclado incorpora algunas acciones de ambos tipos de bombas, la centrífuga y la de impulsor.

Figura 17 Bomba cinética



Las bombas de propulsión se utilizan comúnmente en sistemas domésticos de agua. Éstas se componen de una bomba centrífuga junto con un montaje de eyectores o propulsores. En ésta, la bomba y el motor principal se localizan sobre el nivel de tierra en la parte superior del pozo y el montaje de propulsores está cerca del nivel del agua. La bomba entrega agua a presión al pozo a través de la tubería de presión a la boquilla. La propulsión generada desde la boquilla crea un vacío atrás de ella, el cual provoca que el agua del pozo sea tomada junto con el propulsor.

La corriente combinada pasa a través de un difusor donde el flujo se hace más lento, convirtiendo parte de la energía cinética del agua en presión. Debido a que el difusor se encuentra en el interior de la tubería de succión, el agua es transportada a la entrada de la bomba en donde es lanzada por el impulsor. Parte de la salida se descarga al sistema que se está alimentando, mientras que el resto regresa al propulsor para que la operación continúe.

Si el pozo es de baja profundidad, con menos de 6.0m ( 20 pies ) de la bomba al nivel de agua, el sistema de propulsión puede construirse dentro del cuerpo de la bomba.

Las bombas sumergibles se diseñan de tal forma que la estructura completa de la bomba centrífuga, el motor de alimentación y los dispositivos de succión y descarga puedan sumergirse en el fluido que será bombeado. Estas bombas son útiles para remover agua de desecho en obras de construcción,

minas, pozos de luz, tanques industriales y en barcos de cargas. La succión de la bomba está en el fondo, en donde fluye agua a través del compresor y en el ojo de un impulsor resistente a la abrasión. La descarga fluye hacia arriba a través de un pasaje anular entre la concha y la cubierta de la bomba. En la parte superior de la unidad el flujo se une y fluye hacia una tubería de descarga ubicada en la parte central o tubería de manguera. El motor seco se sella en el centro de la bomba.

Aunque la mayoría de los tipos de bomba centrífuga estudiados hasta ahora han sido de gran tamaño y diseñados para aplicaciones industriales y comerciales, existen disponibles pequeñas unidades para su uso en aparatos de menor escala.

### **C. Datos de funcionamiento de bombas de desplazamiento positivo**

Las características de operación de las bombas de desplazamiento positivo las hacen muy útiles en el manejo de fluidos tales como agua, aceites hidráulicos en sistemas de alimentación de fluidos, químicos, pinturas, gasolinas, grasas adhesivos y en algunos productos alimenticios. Puesto que la entrega es proporcional a la velocidad de rotación del motor, estas bombas pueden utilizarse para medición. Algunas desventajas de ciertos diseños incluyen la salida pulsante, susceptibilidad al daño causado por sólidos y abrasivos, y la necesidad de tener una válvula de alivio. En general, son utilizadas en aplicaciones de alta presión que requieren una entrega relativamente constante.

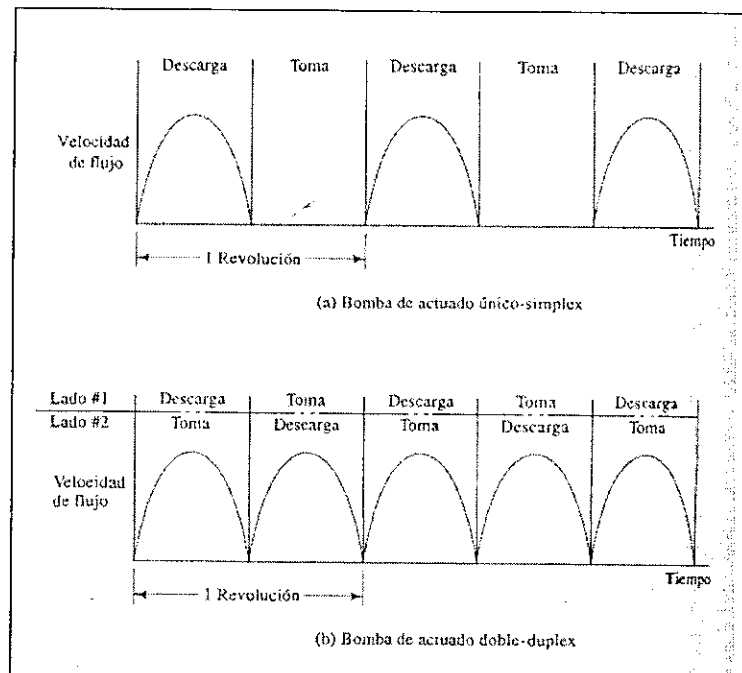
1. Bombas reciprocantes. La bomba reciprocante más simple utiliza un pistón que toma fluido dentro de un cilindro a través de una válvula de alimentación conforme se aleja de la válvula. Por consiguiente, conforme el pistón se mueve hacia delante, la válvula de alimentación se cierra y el fluido es impulsado hacia fuera a través de la válvula de descarga. Tal tipo de bomba se llama simples, y su curva de descarga versus tiempo es parecida a la que se muestra a continuación:

La entrega intermitente resultante es indeseable con mucha frecuencia. Si el pistón es de doble acción o duplex, un lado del pistón entrega fluido

mientras que el otro succiona fluido, resultando en una curva de funcionamiento como la siguiente:

La entrega puede hacerse más pareja teniendo tres o más pistones. Las bombas de pistón para sistemas hidráulicos con frecuencia tienen cinco o seis pistones.

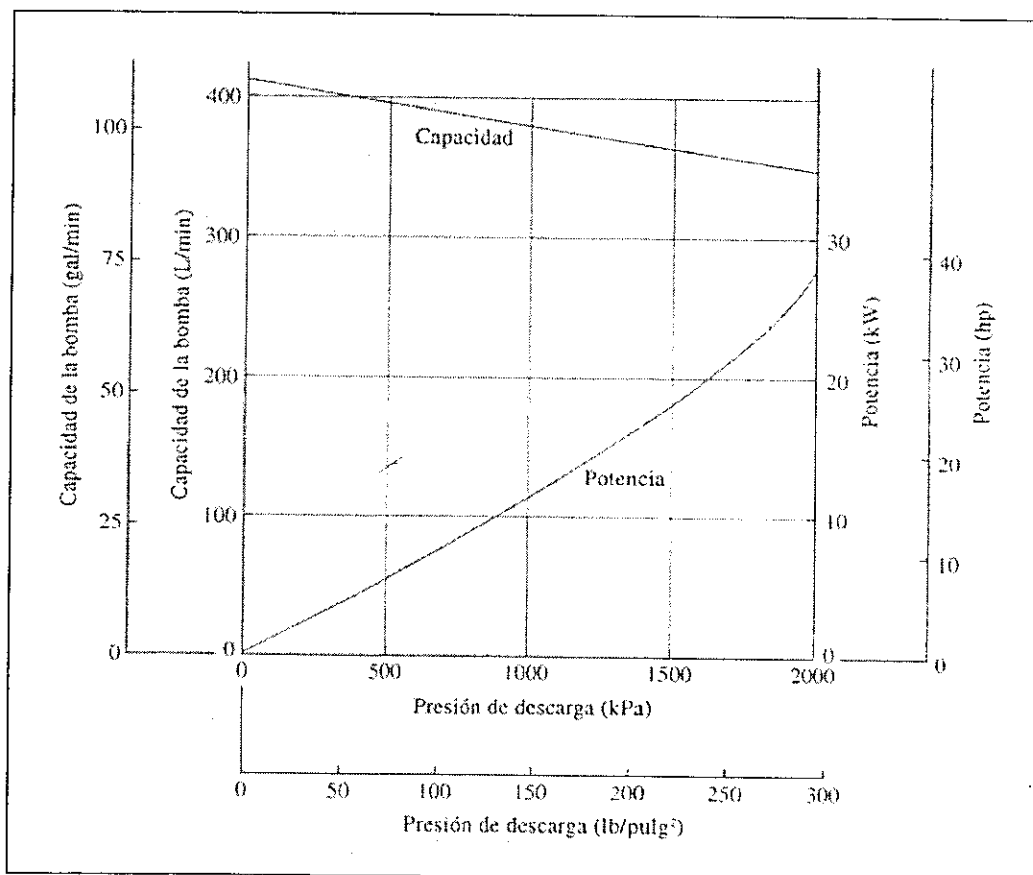
**Figura 18 Bombas reciprocantes**



2. Bombas rotatorias. La siguiente figura muestra la curva de funcionamiento típico de las bombas rotatorias tales como la de engrane, paleta, rosca o de lóbulos. Es una curva de capacidad y potencia versus presión de descarga.

Conforme se incrementa la presión se presenta una ligera disminución en capacidad debido a una derrama interna del lado de alta presión al lado de baja presión. Esto con frecuencia tiene mucha importancia. La potencia que se requiere para manejar la bomba varía casi en forma lineal con la presión. De la misma manera, debido a los diseños de desplazamiento positivo de las bombas rotatorias, la capacidad varía casi en forma lineal con la velocidad de rotación, siempre y cuando las condiciones de succión permitan el libre flujo hacia la bomba.

Figura 19 Bomba rotatoria

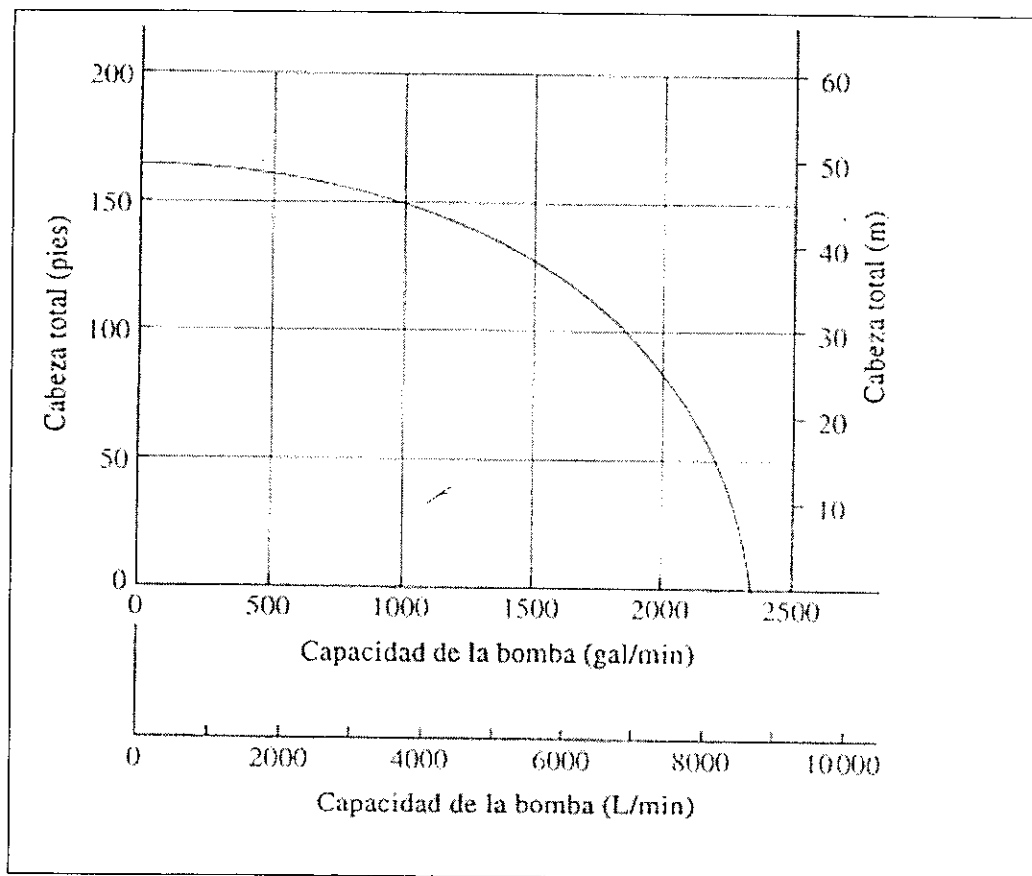


#### D. Datos de funcionamiento de bombas centrífugas

Debido a que las bombas centrífugas no son del tipo de desplazamiento positivo, existe una gran dependencia entre la capacidad y la presión que debe desarrollar la bomba. Esto hace que su funcionamiento sea de alguna forma más complejo. La curva típica de funcionamiento muestra la cabeza total sobre la bomba  $h_a$  versus la capacidad o descarga  $Q$ . Una curva de este tipo se muestra en la figura 20.

La cabeza se calcula de la ecuación general de la energía. Ésta representa la cantidad de energía que se adiciona a una unidad de peso del fluido conforme éste pasa a través de la bomba.

Figura 20 Cabeza total y capacidad de bomba centrífuga

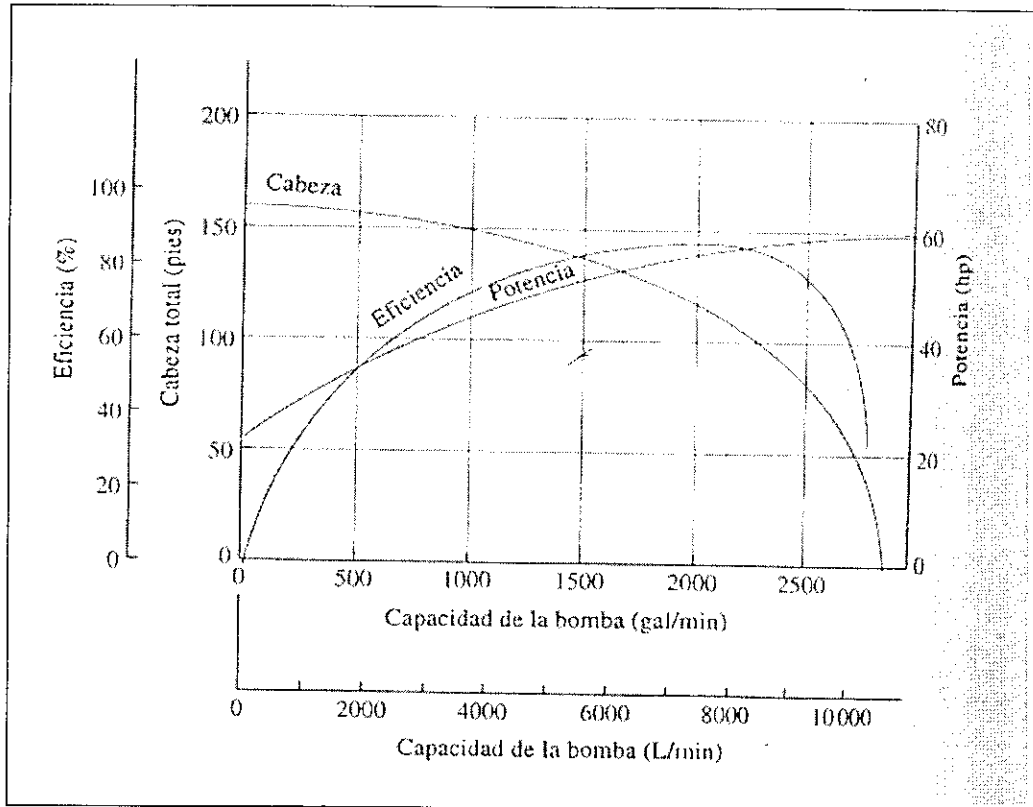


Regularmente en una bomba centrífuga, existe un espacio entre el impulsor rotatorio y la cubierta de la bomba. Este factor coopera en la disminución de la capacidad a medida que la cabeza total aumenta. En realidad, a un valor de corte en la cabeza, el flujo se detiene en forma total cuando toda la energía de entrada de la bomba se utiliza para mantener la cabeza. Por supuesto, la cabeza típica de operación está muy debajo de la cabeza de corte, por lo que se puede lograr gran capacidad.

La eficiencia y potencia que se requieren son factores en el buen funcionamiento de una bomba. La siguiente figura muestra una evaluación del funcionamiento de una bomba más completa, cabeza superpuesta, eficiencia y curvas de potencia y la gráfica de las tres versus la capacidad. La operación normal debe estar en la vecindad del pico de la curva de eficiencia, con

eficiencias dentro del intervalo del 60 al 80 por ciento como valores típicos en las bombas centrífugas.

**Figura 21 Eficiencia y capacidad de la bomba**



### E. Leyes de afinidad para bombas centrífugas

La mayoría de las bombas centrífugas pueden operarse a diferentes velocidades para obtener capacidades variadas. Asimismo, una cubierta de bomba de un determinado tamaño puede acomodar impulsores de diferentes diámetros. Es importante entender la forma en que varían la capacidad, la cabeza y la potencia cuando la velocidad o el diámetro del impulsor varía. Estas relaciones, llamadas reglas de afinidad, se listan aquí. El símbolo  $N$  se refiere a la velocidad de rotación del impulsor, usualmente en revoluciones por minuto ( r/min, o rpm)

Cuando la velocidad varía,

1. La capacidad varía directamente con la velocidad:

$$Q_1/Q_2 = N_1/N_2$$

2. La capacidad total de la cabeza varía con el cuadrado de la velocidad:

$$h_{a1}/h_{a2} = (N_1/N_2)^2$$

3. La potencia requerida por la bomba varía con el cubo de la velocidad:

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3$$

Cuando el diámetro del impulsor varía,

1. La capacidad varía directamente con la velocidad:

$$Q_1/Q_2 = D_1/D_2$$

2. La capacidad total de la cabeza varía con el cuadrado de la velocidad:

$$h_{a1}/h_{a2} = (D_1/D_2)^2$$

3. La potencia requerida por la bomba varía con el cubo de la velocidad:

$$P_1/P_2 = (D_1/D_2)^3$$

## F. Práctica 2: Análisis de una bomba

Hay una gran variedad de bombas disponibles para el transporte de fluidos. Entre estas están las bombas centrífugas. Debido a que éstas no son de desplazamiento positivo, existe una gran dependencia entre la capacidad y la presión que debe desarrollar la bomba. Esto hace que su funcionamiento sea de alguna forma más complejo.

1. Objetivo. El objetivo de la práctica es la determinación de la curva de funcionamiento para una bomba centrífuga. El tipo de curva a describir es del tipo cabeza total versus capacidad. Esta curva representa la cantidad de energía que se adiciona a una unidad de peso del fluido conforme éste pasa a través de una bomba.

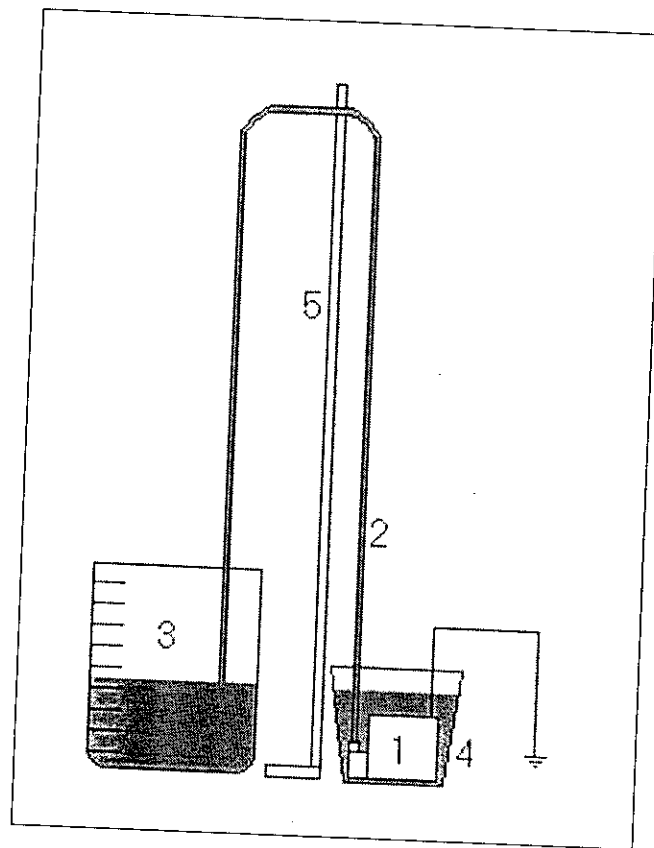
### 2. Materiales e instrumentos

- Una bomba centrífuga para usos domésticos. La capacidad nominal podrá variar pero se recomienda una bomba de capacidad de unos mil litros por hora.
- Seis metros de manguera con diámetro interno lo más cercano posible al diámetro nominal de salida de la bomba.

- Cuatro metros de tubería PVC de  $\frac{3}{4}$ ".
- Cronómetro.
- Cinta métrica.
- Dos cubetas con capacidad para veinte litros. Una de ellas deberá ser graduada.
- Dos abrazaderas metálicas

3. Procedimiento experimental. Como ya se mencionó el objeto de la práctica es obtener la curva de funcionamiento cabeza total versus capacidad. Lo primero será armar el sistema que se muestra en la siguiente figura:

**Figura 22 Sistema de bomba**



1. Bomba
2. Manguera
3. Cubeta graduada
4. Cubeta de succión

#### 5. Tubería de PVC soporte

Como se puede ver en la figura, la manguera está conectada a la salida de la bomba. La manguera se puede sujetar con una de las abrazaderas. La otra punta de la manguera descarga en la cubeta graduada. Se observa que la bomba está sumergida en la cubeta. Esto es posible si la bomba es sumergible. En caso de que la bomba que se tiene no es sumergible, la succión de la bomba se conecta por medio de una tubería a la cubeta de succión, tomando siempre en consideración que esta tenga suficiente agua para evitar que la bomba llegue a succionar aire. La tubería de PVC que sirve de soporte deberá ser marcada con las distintas alturas que representan la cabeza de la bomba. La cantidad de medidas puede variar, pero con unas cinco medidas es suficiente para representar la curva. Ya que el sistema está armado sólo resta hacer funcionar la bomba durante un tiempo determinado, haciendo variar las alturas a las que llega la manguera. Se pueden hacer mediciones por ejemplo de un minuto.

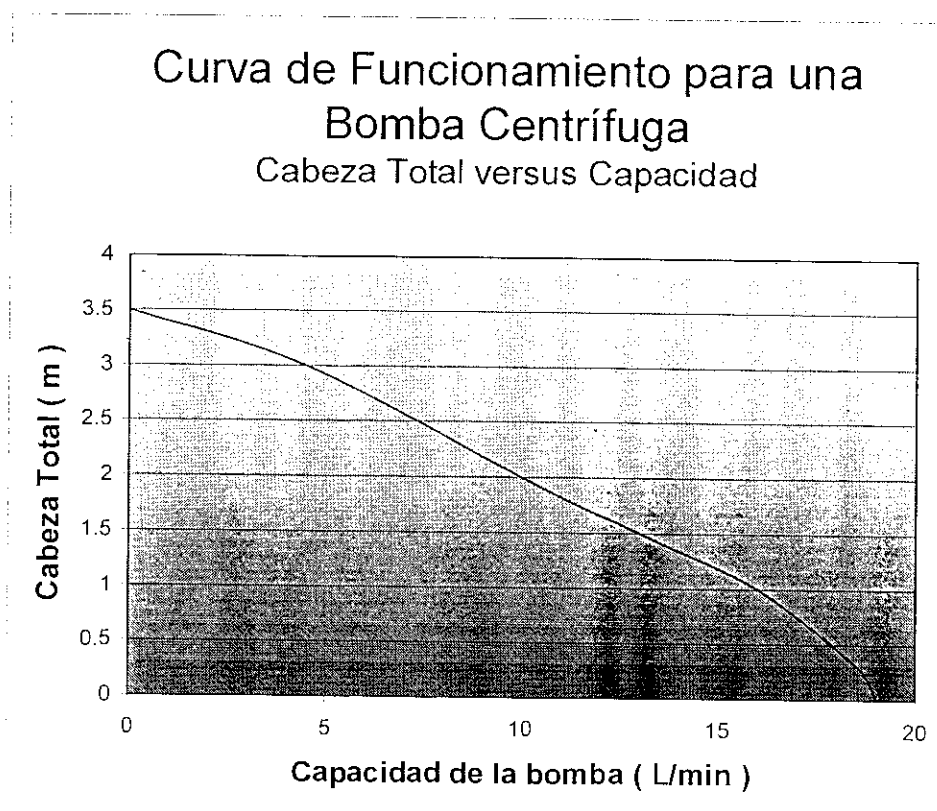
4. Datos y cálculos. Los siguientes datos son obtenidos utilizando los siguientes materiales.

- Una bomba sumergible con capacidad nominal de 1140 litros/hr a 30 cm. Accionada por un motor eléctrico de 1/40 HP. Alimentación 120V.
- Diámetro de salida de la bomba 9mm.
- Diámetro de la manguera 10 mm.
- Intervalos de accionamiento de la bomba: 1 minuto.
- Alturas de cabeza total a los cuales se realizaron ediciones: .30 m, 1m, 1.5m, 2.0m y 3.0m.

Cuadro 9 Cabeza total, capacidad y capacidad proyectada

Cabeza Total m	Capacidad L / min	Capacidad Proyectada L / hr
0.00	19.00	1140.00
0.30	18.50	1110.00
1.00	16.00	960.00
1.50	13.00	780.00
2.00	10.00	600.00
3.00	4.50	270.00

Gráfica 1 Curva de funcionamiento para una bomba centrífuga



## V. FLUJO EN CANAL ABIERTO

El flujo en canal abierto es un sistema en que la superficie del fluido está expuesta a la atmósfera. Existen muchos ejemplos de canales abiertos en la naturaleza, como los ríos y las corrientes. Existe también flujo en canal abierto en sistemas diseñados para proveer agua a comunidades, para transporte de agua de lluvia o drenajes. Ejemplos de este tipo de sistemas son los drenajes en edificios y las coladeras en los extremos de las calles.

### A. Radio hidráulico

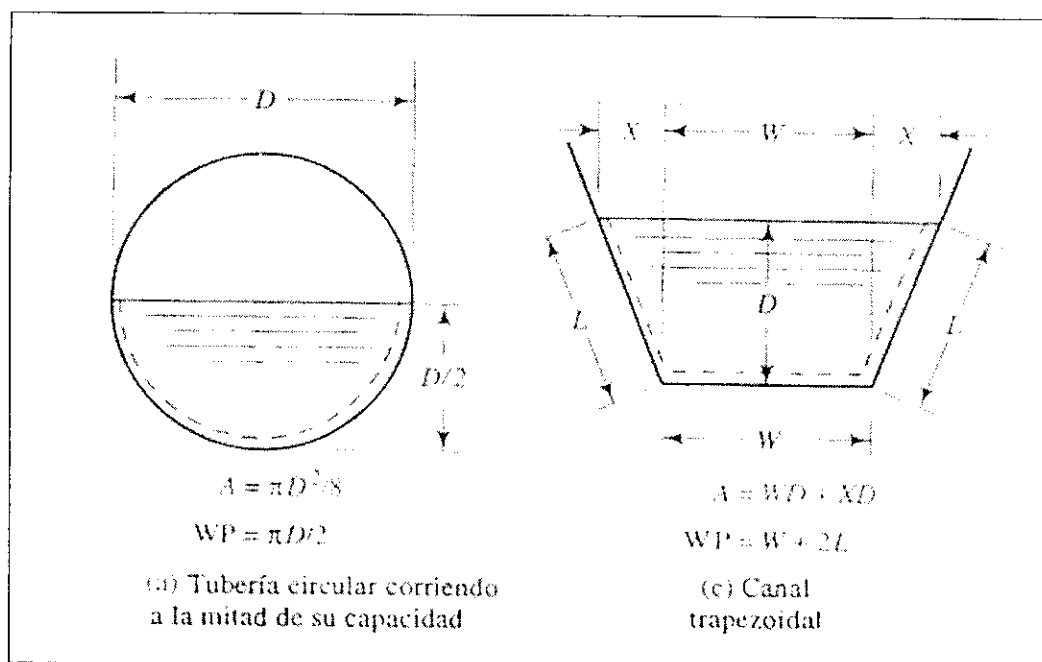
El radio hidráulico es la dimensión característica de los canales abiertos. Éste está definido como la relación entre la sección transversal neta de una corriente de flujo y el perímetro mojado de la sección. Esto es,

$$R = A / WP = \text{área} / \text{perímetro mojado}$$

La unidad de R es el metro en el sistema de unidades SI. En el Sistema Británico de Unidades R se expresa en pies.

Por ejemplo:

Figura 23 Radio hidráulico



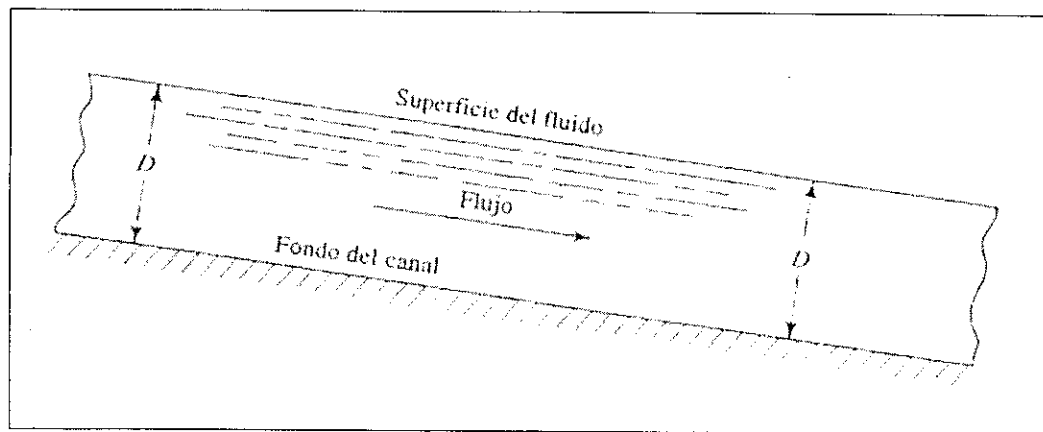
En los cálculos del radio hidráulico, el área transversal neta se obtiene de la geometría de la sección. El perímetro mojado es la suma de la longitud de los perímetros de la sección que están en contacto con el fluido. En cada ilustración es área sombreada es el fluido. Para determinar el perímetro, no se toma en cuenta la superficie del fluido que está en contacto con la atmósfera.

### B. Clasificación del flujo en canal abierto

El flujo en canal abierto puede clasificarse en varios tipos. Estos son el flujo estable uniforme, flujo uniformemente variado, flujo no uniformemente variado, flujo variado rápidamente y flujo graduado gradualmente.

El *flujo estable uniforme* se presenta cuando la velocidad de flujo de volumen, o descarga, permanece constante en la sección que estamos interesados, además que la profundidad del flujo no varia. Se necesita también para poder tener un flujo estacionario uniforme, que la sección transversal del canal no debe cambiar a lo largo de toda su longitud. A este tipo de canal se llama prismático. La figura abajo muestra la vista lateral de un flujo estable uniforme.

Figura 24 Canal

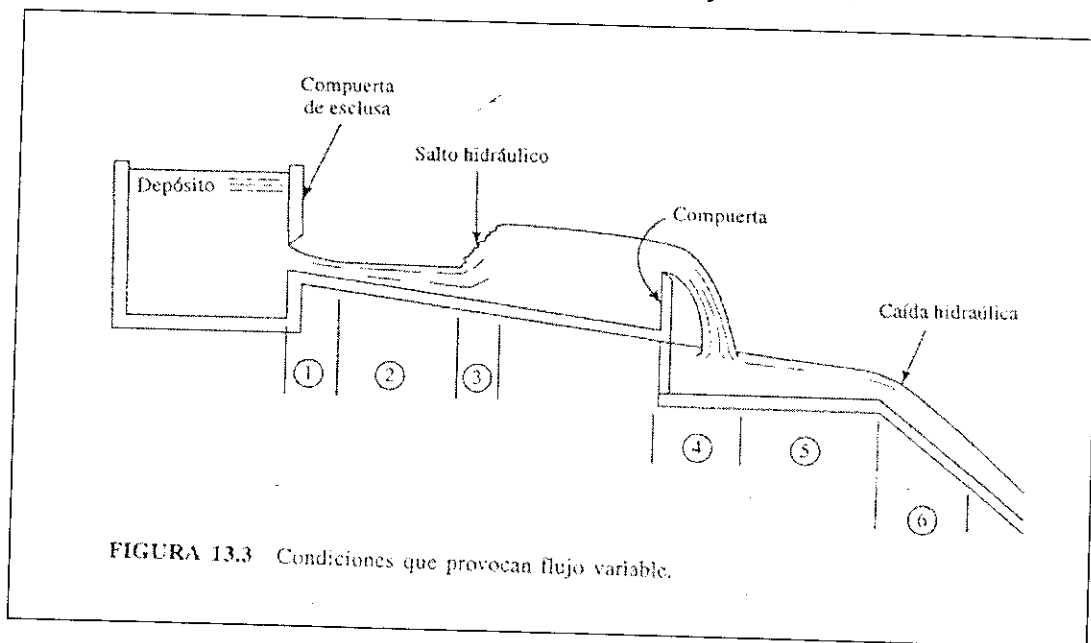


El *flujo uniformemente variado* se presenta cuando la descarga permanece constante pero la profundidad del fluido cambia a través de la sección en que estamos interesados. Esto se da cuando el canal no es prismático.

El flujo no uniformemente variado se presenta cuando la descarga varía con el tiempo resultando en cambios en la profundidad del fluido a lo largo de la sección de interés, independientemente si el canal es prismático o no.

El flujo variado se puede clasificar en *flujo variado rápidamente* y *flujo variado gradualmente*. Como sus nombres lo implican, la diferencia está en la rapidez de cambio de profundidad con la posición a lo largo del canal. En la siguiente figura se ilustran una serie de condiciones en las que se presenta flujo variado.

**Figura 25 Condiciones para flujo variable**



El siguiente análisis describe el flujo en las diferentes partes de la figura.

Sección 1. El flujo comienza desde un depósito en el que el fluido está prácticamente en reposo. La *compuerta de esclusa* es un dispositivo que permite que el fluido corra desde el depósito en un punto situado bajo la superficie. Conforme el fluido se acelera, se presenta flujo variado en forma rápida cerca de la compuerta y es muy probable que la velocidad de flujo sea muy grande en ésta área.

Sección 2. Si el canal que sigue a la compuerta es relativamente corto, y si su sección transversal no varía mucho, entonces se presenta flujo variado en

forma gradual. Si el canal es prismático y lo suficientemente largo se puede presentar flujo uniforme.

Sección 3. La formación del *salto hidráulico* es un fenómeno de flujo en canal abierto muy curioso. El flujo antes de saltar es muy rápido y relativamente bajo. En el salto, el flujo se vuelve muy turbulento y se disipa una gran cantidad de energía. Después del salto, la velocidad de flujo es mucho más lenta y la profundidad del fluido es mayor.

Sección 4. Una puerta es una obstrucción ubicada en la corriente de flujo que provoca un cambio abrupto en la sección transversal del canal. Las puertas pueden utilizarse como dispositivos de control o para medir la velocidad de flujo de volumen. Usualmente el flujo es variado en forma rápida conforme viaja por la puerta con una catarata que se presenta en dirección hacia abajo.

Sección 5. Al igual que en la sección 2, el flujo hacia abajo usualmente va variando gradualmente si el canal es prismático.

Sección 6. La *caída hidráulica* se presenta cuando la pendiente del canal se incrementa en forma repentina con un ángulo abrupto. El flujo se acelera debido a la gravedad y se presenta un flujo variado rápidamente.

### C. Número de Reynolds en el flujo en canal abierto

Para secciones transversales circulares cerradas, el número de Reynolds es:

$$N_R = vD / \nu$$

Donde  $v$  = velocidad promedio del flujo,  $D$  = diámetro de la tubería, y  $\nu$  = viscosidad cinemática del fluido. Se conoce que se presenta flujo laminar cuando  $N_R < 2000$  y se presenta flujo turbulento cuando  $N_R > 4000$ . Esto se da en la mayoría de las situaciones de flujo de tubería en la práctica. El número de Reynolds representa los efectos de la viscosidad del fluido en relación con la inercia del fluido.

En el caso del flujo en canal abierto, la dimensión característica es el radio hidráulico  $R$ . Para secciones transversales circulares completas el diámetro  $D = 4R$ . Para el flujo en canal abierto el número de Reynolds es:

$$N_R = vR / \nu$$

Se conoce por medio de evidencia experimental que en canales abiertos, se presenta flujo laminar cuando  $N_R < 500$ . Al rango que está entre 500 y 2000 se le conoce como región de transición. El flujo turbulento se presenta cuando  $N_R > 2000$ .

#### D. Tipos de flujo en canal abierto

El número de Reynolds y los términos laminar y turbulento no son suficientes para caracterizar todos los tipos de flujo en canal abierto. Es necesario tomar en cuenta, además de la viscosidad versus los efectos de inercia, la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas de gravedad. El número de Froude,  $N_F$ , se define como:

$$N_F = v / (gy_h)^{1/2}$$

donde:

$$y_h = A / T$$

y  $T$  es el grosor de la superficie libre del fluido en la parte superior del canal.

Cuando el número de Froude es igual a 1.0, esto es, cuando  $v = (gy_h)^{1/2}$ , el flujo se llama flujo crítico. Cuando  $N_F < 1.0$ , el flujo es subcrítico, y cuando  $N_F > 1.0$  el flujo es supercrítico.

Por consiguiente, pueden existir los siguientes tipos de flujos:

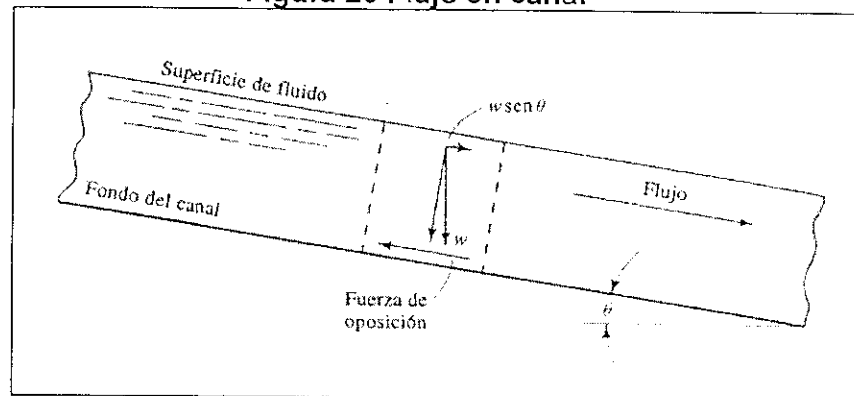
1. Subcrítico laminar.  $N_R < 500$  y  $N_F < 1.0$
2. Subcrítico turbulento.  $N_R > 2000$  y  $N_F < 1.0$
3. Supercrítico turbulento.  $N_R > 2000$  y  $N_F > 1.0$
4. Supercrítico laminar.  $N_R < 500$  y  $N_F > 1.0$

Además, los flujos pueden estar en regiones de transición, pero estos flujos son inestables y muy difíciles de caracterizar. En el flujo laminar, existe muy poca o nada de mezcla de flujo de tal forma que la corriente de tinte inyectado permanecerá casi inalterada. El flujo turbulento presenta un mezclado grande y la corriente teñida se disipa rápidamente a través del fluido.

### E. Flujo estable uniforme en canales abiertos

En la figura de abajo se muestra un flujo estable uniforme en un canal abierto. Lo que caracteriza al flujo uniforme es que la superficie del fluido es paralela a la pendiente del fondo del canal. Se utiliza el símbolo  $S$  para indicar la pendiente del fondo del canal y  $S_w$  para la pendiente de la superficie del agua. De este modo, para flujo uniforme  $S = S_w$ . En teoría, el flujo uniforme debe de poder existir solo si el canal es prismático. Por ejemplo un rectángulo. Sin embargo si la sección transversal o pendiente del canal está cambiando, entonces la corriente del flujo puede ser convergente como divergente y se puede presentar un flujo variable. En un flujo uniforme, la fuerza guía del flujo la proporciona la componente del peso del fluido que actúa a lo largo del canal. Ésta fuerza es  $w \sin \theta$ , donde  $w$  es el peso de un cierto elemento de fluido y  $\theta$  es el ángulo de pendiente del canal. Si el flujo es uniforme, entonces no puede tener una aceleración. Por lo tanto, debe haber una fuerza opuesta e igual actuando a lo largo de la superficie del canal. Ésta es una fuerza de fricción que depende de la rugosidad de las superficies del canal y del tamaño y la forma de la sección transversal.

Figura 26 Flujo en canal



Igualando las expresiones para la fuerza guía y la fuerza opositora, se puede derivar una expresión para la velocidad promedio del flujo uniforme. Una forma comúnmente utilizada de la ecuación que resulta la desarrolló Robert Manning. En las unidades SI, la ecuación de Manning se escribe como:

$$v = 1.00/n * R^{2/3} S^{1/2}$$

Las unidades deben ser consistentes en ésta ecuación. La velocidad promedio del flujo  $v$  estará en metros por segundo cuando el radio  $R$  este en metros. La pendiente del canal  $S$ , que se define posteriormente, no tiene dimensiones. El término final  $n$  es un factor de resistencia que comúnmente llamado  $n$  de Manning. El valor de  $n$  depende de la condición de la superficie del canal.

A continuación se presenta una tabla con valores típicos de  $n$  para materiales que comúnmente se utilizan para canales artificiales y corrientes naturales.

**Cuadro 10 Coeficientes de fricción**

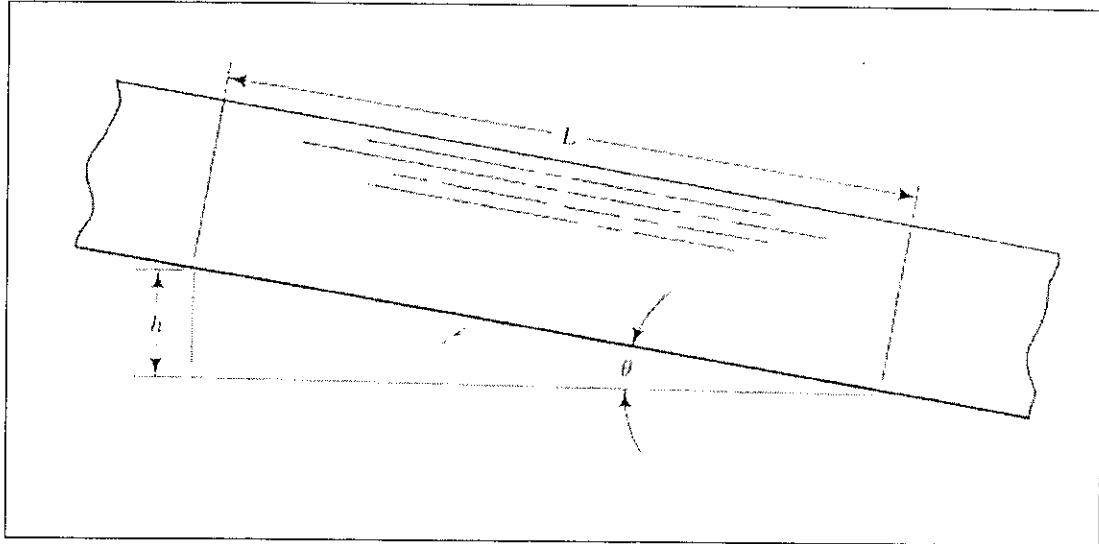
<i>Descripción del Canal</i>	<i>n</i>
Vidrio, cobre, plástico u otras superficies lisas.	0.010
Acero liso sin pintar, madera plana	0.012
Acero pintado o hierro recubierto	0.013
Asfalto liso, azulejo de drenaje de yeso común	0.013
Concreto con acabado y ladrillo vidriado	0.013
Hierro sin recubrimiento, tubería de acero negro forjado	0.014
Alcantarilla de azulejo de cerámico vidriada	0.014
Ladrillo en mortero de cemento	0.015
Concreto semiterminado, formado	0.017
Tierra excavada limpia	0.022
Drenaje para tormenta, de metal corrugado	0.024
Tierra con ligero cepillado	0.050
Tierra con fuerte cepillado	0.100

La pendiente  $S$  de un canal puede darse de varias formas. Idealmente se define como la relación de la caída vertical  $h$  y la distancia horizontal sobre la que se presenta la caída. Para pequeñas pendientes, las cuales son típicas en el flujo en canales abiertos, es más práctico utilizar  $h/L$  donde  $L$  es la longitud del canal. Normalmente, la magnitud de la pendiente para corrientes naturales y estructuras de drenaje es muy pequeña. El valor típico es de 0.001. Ésto viene siendo un ángulo de  $0.057^\circ$ . Debido a que el ángulo es muy pequeño, es raramente utilizado como una medida de la pendiente.

Su puede calcular la velocidad de flujo de volumen en el canal de la ecuación de continuidad:

$$Q = Av$$

**Figura 27 Análisis de flujo en canal abierto**



En el análisis del flujo en el canal abierto, a \$Q\$ se le llama descarga.

$$v = 1.00/n * R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = Av$$

Uniendo estas dos ecuaciones obtenemos:

$$Q = 1.00/n * AR^{2/3} S^{1/2}$$

Este es el único valor de descarga para el que se presentará flujo uniforme para la profundidad de canal dada, y se le llama descarga normal. Las unidades de \$Q\$ son \$m^3/s\$ cuando el área se expresa en metros cuadrados (\$m^2\$) y el radio hidráulico en metro (m).

Una manera útil de expresar esta ecuación es la siguiente:

$$AR^{2/3} = nQ/S^{1/2}$$

El término del lado izquierdo de la ecuación depende únicamente de la geometría de la sección. De modo que si tenemos una descarga, una pendiente y tipo de superficie, podemos determinar las características geométricas de una canal. Con la misma ecuación, con el tamaño y forma del canal se puede calcular la profundidad a que se puede presentar la descarga \$Q\$. Ésta profundidad se llama profundidad normal.

Por convención se toman los valores de  $n$  de Manning en forma adimensional de tal forma que se pueden usar los mismos datos en la sistemas SI y Sistema Ingles. Al convertir las unidades del sistema métrico al ingles, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$v = 1.49/n * R^{2/3}S^{1/2}$$

$$Q = Av = 1.49/n * AR^{2/3}S^{1/2}$$

$$AR^{2/3} = nQ/(1.49*S^{1/2})$$

En estas ecuaciones,  $Q$  es la descarga normal en pies cúbicos por segundo ( $\text{pies}^3/\text{s}$ ) cuando  $A$  es el área de flujo en pies cuadrados ( $\text{pies}^2$ ) y  $R$  está expresando en pies.

### F. Geometría de los canales abiertos típicos

Las formas que normalmente se utilizan en canales abiertos incluyen las circulares, rectangulares trapezoidales y triangulares.

La formula trapezoidal es popular por varias razones. Es una forma eficiente debido a que proporciona un área de flujo grande en relación con el perímetro mojado. Los lados con pendiente son adecuados para canales fabricados en la tierra debido a que las pendientes pueden fijarse a un ángulo al cual los materiales de construcción son estables.

La pendiente de los lados puede definirse por el ángulo con respecto de la horizontal o por medio de la inclinación, la relación de las distancia horizontal con la distancia vertical. Este valor, como se puede ver en la tabla, se conoce como  $z$ . Los canales de tierra hechos de forma trapezoidal utilizan valores para  $z$  desde 1.0 hasta 3.0

El rectángulo es un caso especial del trapezoide con una pendiente lateral de  $90^\circ$ , o  $z = 0$ . Los canales de concreto formado se fabrican normalmente con ésta forma. El canal triangular también es un caso especial de trapezoide con un ancho de fondo igual a cero.

La ecuación para el cálculo de los datos para las secciones circulares a diferentes profundidades también se incluye en la tabla.

### G. Las formas mas eficientes para canales abiertos

El término transporte se utiliza para indicar la capacidad de transporte de canales abiertos. Su valor puede deducirse de la ecuación de Manning. En unidades métricas SI,

$$Q = 1.00/n * AR^{2/3}S^{1/2}$$

Todo lo que está en el lado derecho de esta ecuación depende del diseño del canal excepto la pendiente. Podemos entonces definir el transporte K como:

$$K = Q = 1.00/n * AR^{2/3}$$

En sistema inglés:

$$K = 1.49/n * AR^{2/3}$$

La ecuación de Manning es entonces:

$$Q = KS^{1/2}$$

El transporte de un canal sería máximo cuando el perímetro mojado sea el mínimo para un área determinada. Utilizando este criterio se puede encontrar que la forma más eficiente es el semicírculo.

### H. Flujo crítico y energía específica

La consideración de energía en flujo de canal abierto usualmente involucra una determinación de energía que posee por el fluido en una sección. La energía total se mide en relación con el fondo del canal y se compone de energía potencial debido a la profundidad del fluido más la energía potencial debido a su velocidad.

Asignando E como la energía total, se tiene:

$$E = y + v^2/2g$$

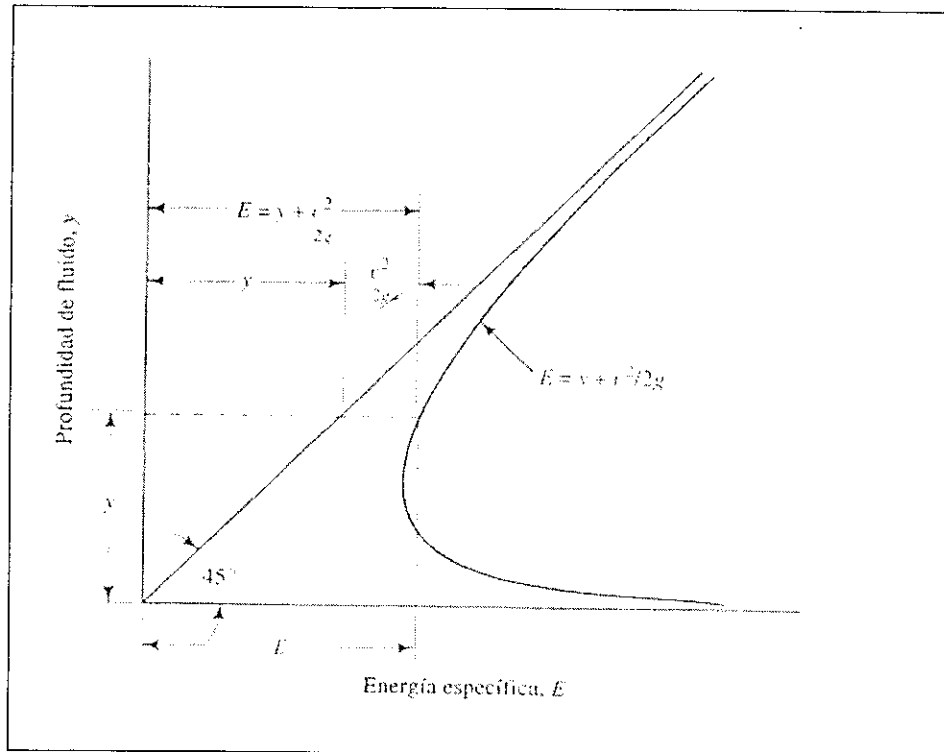
donde y es la profundidad y v es la velocidad promedio de flujo. Esta ecuación tiene unidades de energía por unidad de peso de fluido fluyendo. En el análisis de flujo en canal abierto, a E normalmente se le conoce como energía específica. Para una descarga determinada Q, la velocidad es Q/A. Por consiguiente:

$$E = y + Q^2/2gA^2$$

Puesto que el área se puede expresar en términos de la profundidad de flujo, esta ecuación relaciona la energía específica debido a la profundidad de flujo.

Una gráfica de profundidad  $y$  versus la energía específica  $E$  es útil para visualizar los posibles regímenes de flujo en el canal. Para una sección de canal en particular y una descarga, la curva de energía se parece a la siguiente:

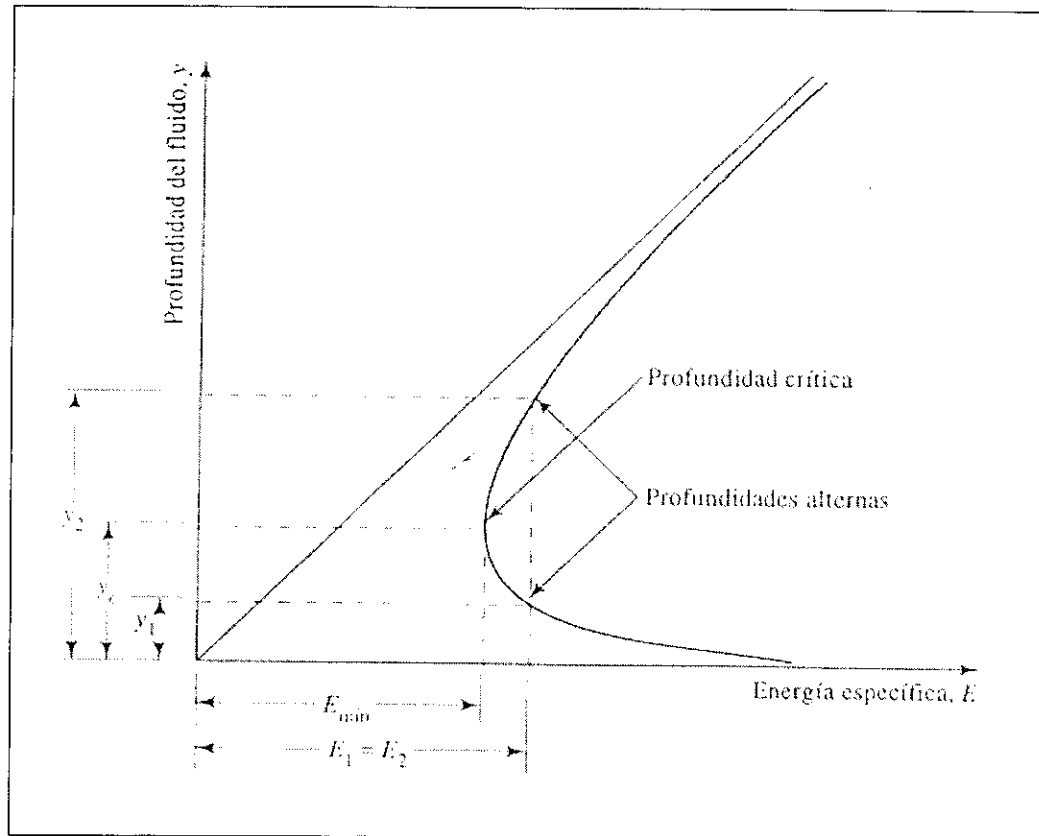
**Figura 28 Energía específica y profundidad de fluido**



Algunas características de esta curva son importantes. La línea a  $45^\circ$  en la gráfica representa el bosquejo  $E = y$ . Por consiguiente para cualquier punto sobre la curva, la distancia horizontal a esta línea desde el eje  $y$  representa energía potencial  $y$ . La distancia que queda a la curva de energía específica es la energía cinética  $\frac{v^2}{2g}$ . Aparece un valor mínimo definido de  $E$  y podemos demostrar que éste se presenta cuando el flujo se halla en el estado crítico, cuando  $N_F = 1$ .

La profundidad que corresponde a la energía específica mínima es por lo tanto llamada profundidad crítica  $y_c$ . Para cualquier profundidad mayor a  $y_c$ , el flujo es supercrítico. Por el contrario, para cualquier nivel de energía más grande que el mínimo, existen dos profundidades diferentes.

Figura 29 Profundidades críticas y alternas



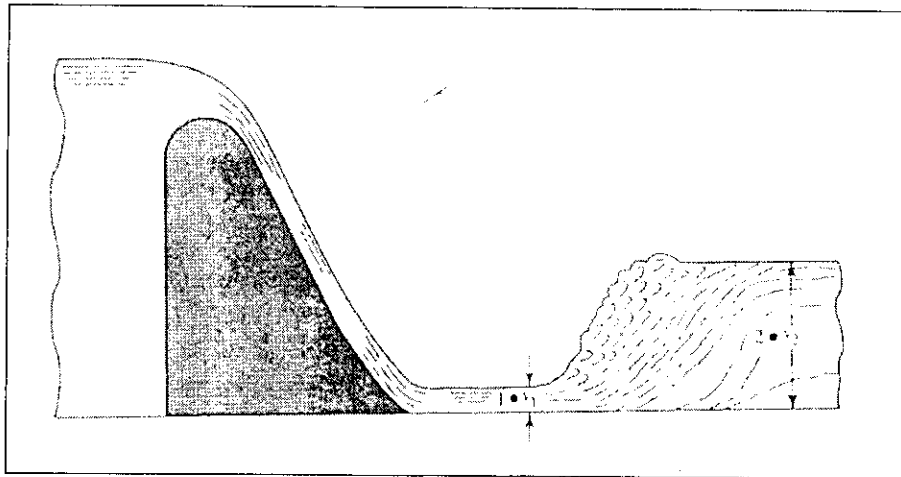
En la figura anterior tanto  $y_1$  debajo de la profundidad crítica  $y_c$ , y  $y_2$  arriba de  $y_c$  tienen la misma energía. En el caso de  $y_1$ , el flujo es supercrítico y mucha de la energía es energía cinética debido a la alta velocidad de flujo. A la profundidad mas grande  $y_2$ , el flujo es más lento y solamente una pequeña porción de la energía es cinética. Las dos profundidades  $y_1$  y  $y_2$  se llaman profundidades alternas para la energía específica  $E$ .

### I. Salto hidráulico

El agua fluyendo sobre el escurridor normalmente tiene una velocidad de altura en el rango supercrítico cuando éste alcanza el fondo de la relativamente abrupta pendiente en la sección 1. Si esta velocidad se fuera a mantener en la cama de corriente natural mas allá de la estructura lisa del escurridor, los lados y el fondo de la corriente pueden erosionarse en una forma severa.

En lugar de eso, un buen diseño provocaría un salto hidráulico como se muestra, donde la profundidad del flujo cambia en forma abrupta de  $y_1$  y  $y_2$ . Dos efectos benéficos resultan del salto hidráulico. Primero, la velocidad del flujo disminuye en forma sustancial, disminuyendo la tendencia del flujo a erosionar la cama de corriente. Segundo, mucho del exceso de energía contenido en el flujo de alta velocidad se disipa en el salto. La disipación de energía se presenta debido a que el flujo en el salto es extremadamente turbulento.

Figura 30 Salto hidráulico



Con el fin de que se presente un salto hidráulico, el flujo antes del salto debe estar en el rango supercrítico. Ésto es, en la sección 1 de la figura,  $y_1$  es menor que la profundidad crítica para el canal y el número de Froude  $F_{N1}$  es mayor que 1.0. La profundidad en la sección 2 después del salto puede calcularse de la ecuación:  $y_2 = (y_1/2)(1 + 8F_{N1}^2)^{1/2} - 1$

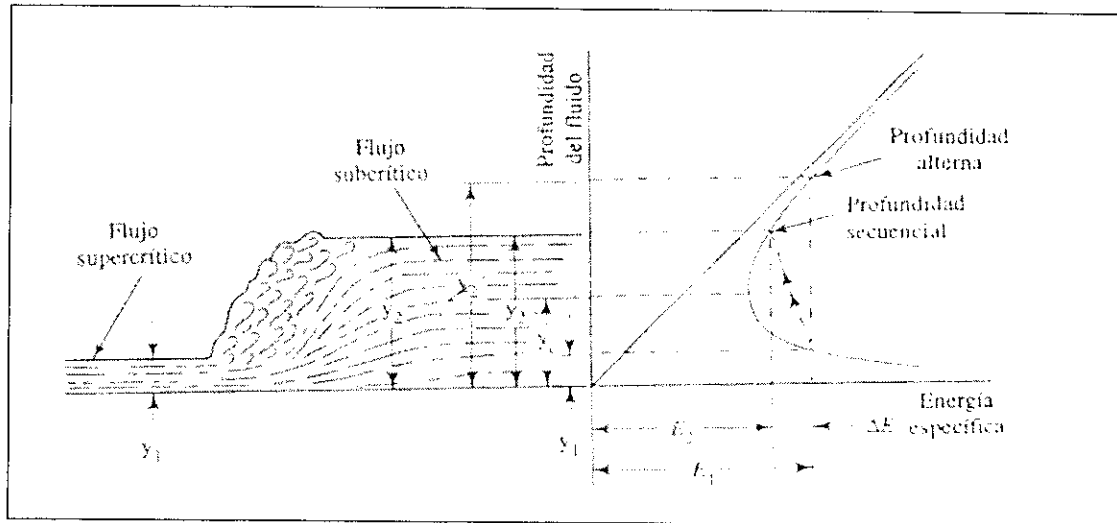
También, la pérdida de energía en el salto depende de las dos profundidades  $y_2$  y  $y_1$ :

$$E_1 - E_2 = \Delta E = (y_2 - y_1)^3 / 4y_1y_2$$

La figura abajo ilustra lo que pasa en un salto hidráulico utilizando una curva de energía específica. El flujo entra al salto con una energía  $E_1$  que corresponde a una profundidad supercrítica  $y_1$ . En el salto, se incrementa en forma abrupta la profundidad. Si no se perdiera energía, la nueva profundidad sería  $y_2$  que es la profundidad alterna para  $y_1$ . Sin embargo, puesto la energía se disiparía en forma parcial,  $\Delta E$ , la nueva profundidad real  $y_2$  corresponde al

nivel de energía  $E_2$ . Aún  $y_2$  se encuentra en el rango subcrítico y se mantendría un flujo tranquilo hacia abajo del salto. El nombre dado a la profundidad real  $y_2$  después del salto es profundidad secuencial.

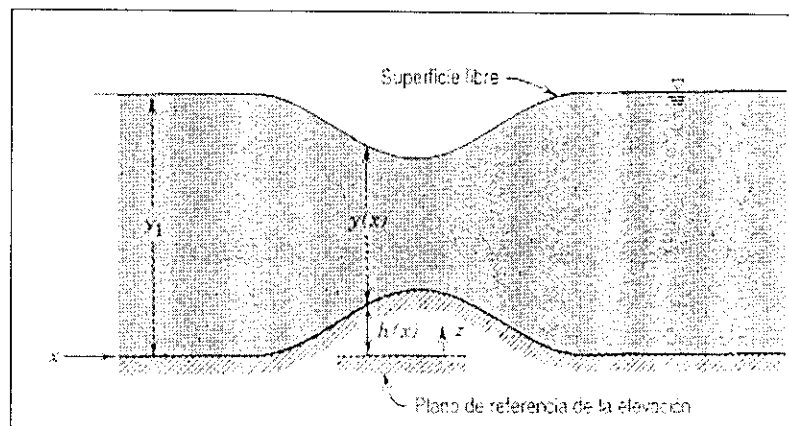
**Figura 31 Salto hidráulico y energía específica**



### J. Flujo sobre una protuberancia

Consideramos un flujo sin fricción en un canal rectangular horizontal de ancho constante,  $b$ , con una protuberancia en la plantilla del canal, como se muestra en la figura 31. La altura de la protuberancia sobre la plantilla horizontal del canal es  $h(x)$ ; la profundidad del agua,  $y(x)$ , se mide desde la superficie local del fondo del canal. Se supone que el flujo será uniforme en cada sección. Estamos interesados en investigar la forma de la superficie libre cuando el flujo pasa por la protuberancia.

**Figura 32 Flujo sobre una protuberancia**



Como el flujo es estable, incompresible y sin fricción, podemos aplicar la ecuaciones de la energía y la continuidad:

Aplicando la ecuaciones a lo largo de la corriente de la superficie libre entre la posición 1 aguas arriba y el punto sobre la protuberancia, se obtiene

$$p_1/\gamma + y_1 + v_1^2/2g - h_L = p_2/\gamma + y_2 + v_2^2/2g$$

Puesto que la presión es la atmosférica a lo largo de la superficie, se anulan los términos que involucran presión, y se tiene:

$$v_1^2/2g + y_1 = v_2^2/2g + y_2 + h = \text{constante}$$

La relación de flujo volumétrico es constante. De tal modo, de la continuidad para el flujo estable, incompresible y uniforme en una sección,

$$Q/b = v_1 y_1 = v_2 y_2$$

Al sustituir se tiene:

$$Q^2/2gb^2 y_1^2 + y_1 = Q^2/2gb^2 y_2^2 + y_2 + h = \text{constante.}$$

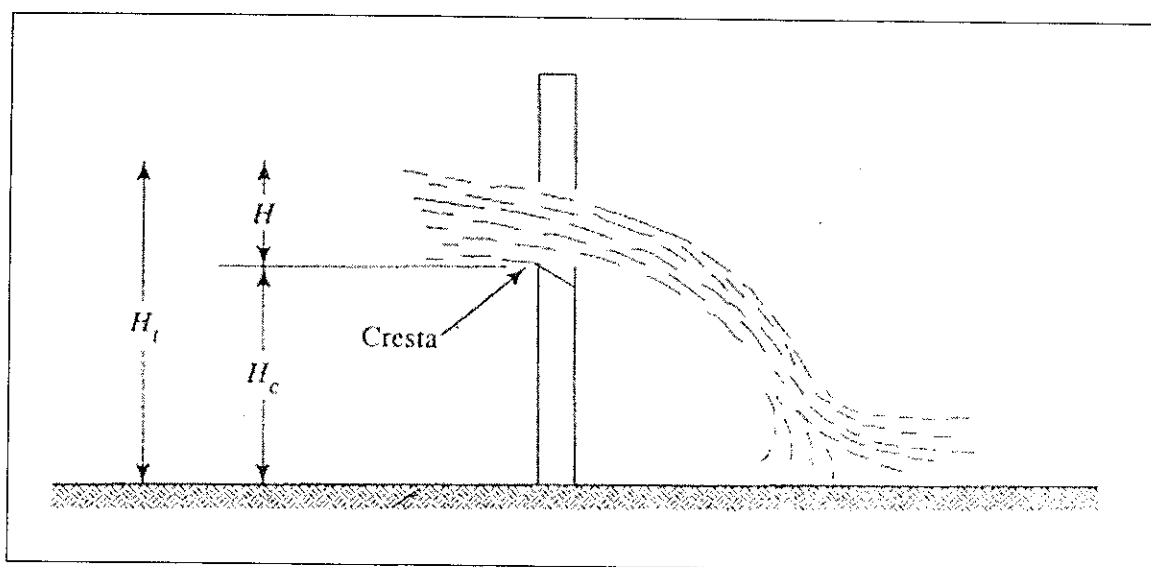
A partir de esto podemos determinar la velocidad y la profundidad del flujo arriba de la protuberancia si se tiene la altura y velocidad del flujo en el canal.

## K. Medición de Flujo en Canal Abierto

Dos dispositivos ampliamente utilizados en la medición de flujo en canales abiertos son los vertederos y los resbaladeros. Cada uno de ellos provoca que el cambie la corriente, lo cual a su vez cambia el nivel de la superficie del fluido. El nivel de la superficie resultante en relación con alguna característica del dispositivo está relacionada con la cantidad de flujo. Grandes valores de velocidades de flujo se pueden medir con vertederos y resbaladeros. Nos centraremos en los vertederos, ya que estos serán los que utilizaremos en la práctica.

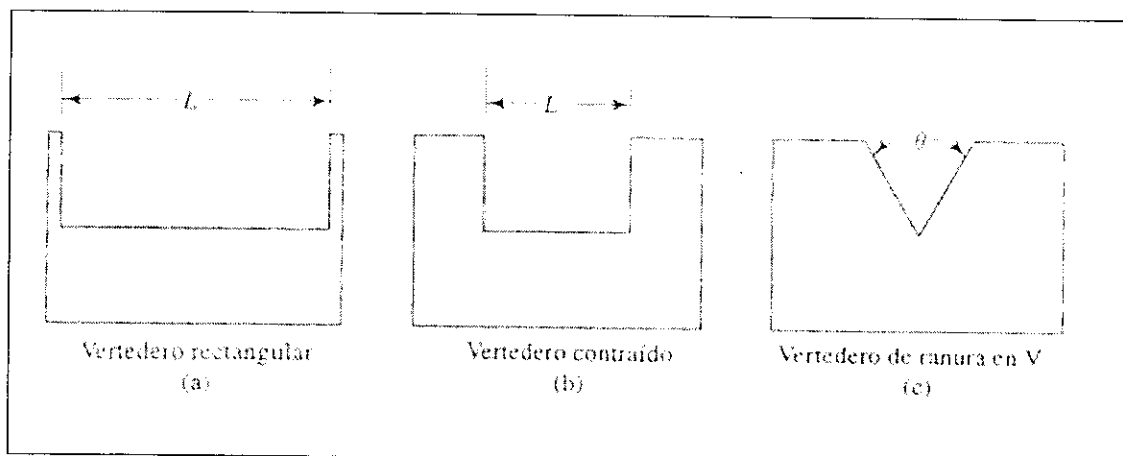
1. Vertederos. Un vertedero es una barrera o presa colocada en el canal para que el fluido se mantenga detrás del vertedero y después caiga a través de una ranura cortada en la cara del vertedero. Dos geometrías de ranuras son la rectangular y la triangular. La siguiente figura muestra una vista lateral de un vertedero en operación.

Figura 33 Vertederos



Las vistas frontales que muestran las diferentes geometrías de ranura se despliegan en la siguiente figura.

Figura 34 Geometrías de vertederos



La descarga sobre el vertedero depende de las dimensiones de la ranura y de la cabeza  $H$  del fluido. La figura 33 muestra que la superficie del fluido está curvada conforme pasa sobre la cresta del vertedero. Con la finalidad de asegurar mediciones consistentes, el valor de  $H$  deberá ser la diferencia entre la altura de la cresta  $H_c$  y la altura total de la superficie del líquido  $H_t$ , con  $H_t$  medida hacia arriba de la placa del vertedero donde el perfil de la superficie no

se encuentra afectado. Normalmente, esta distancia hacia arriba es aproximadamente seis veces la cabeza H máxima esperada.

La ecuación teórica de descarga sobre un vertedero de ranura rectangular es,

$$Q = 2/3L\text{raiz}(2gH^3),$$

Donde L es la longitud de la cresta entre los lados de la ranura y H es la cabeza sobre la cresta. La descarga real es diferente del valor teórico por varias razones; por lo tanto, se han desarrollado relaciones más precisas y fáciles de usar. La mayoría de las fórmulas toman la forma

$$Q = CLH^{3/2}$$

Donde C es el coeficiente de descarga, L es la longitud efectiva de la cresta y H es la cabeza arriba de la cresta del vertedero. Para vertedero rectangular de ancho completo, puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$Q = (3.27 + 0.40H/H_c)LH^{3/2}$$

### **L. Práctica 3: Flujo en canales abiertos**

El flujo en canal abierto es un sistema de flujo en el cual la superficie del fluido está expuesta a la atmósfera. Muchos ejemplos de canales abiertos se presentan en la naturaleza y en sistemas para proveer de agua a comunidades o para transportar el agua de una tormenta o el drenaje en forma segura.

En la siguiente práctica se pretende el análisis de algunas de las características que se pueden ver en canales abiertos, mediante la utilización de un canal de corte transversal rectangular. Entre estos están el radio hidráulico, la velocidad del flujo y el salto hidráulico.

Como se mostró en la parte teórica de este trabajo, el radio hidráulico es la relación entre la sección transversal neta de una corriente de flujo y el perímetro mojado de la sección. Esto es,

$$R = AWP = \text{Área} / \text{Perímetro Mojado}.$$

Para la obtención de la velocidad de flujo se utiliza la ecuación de Manning. Esta está dada por la siguiente ecuación:

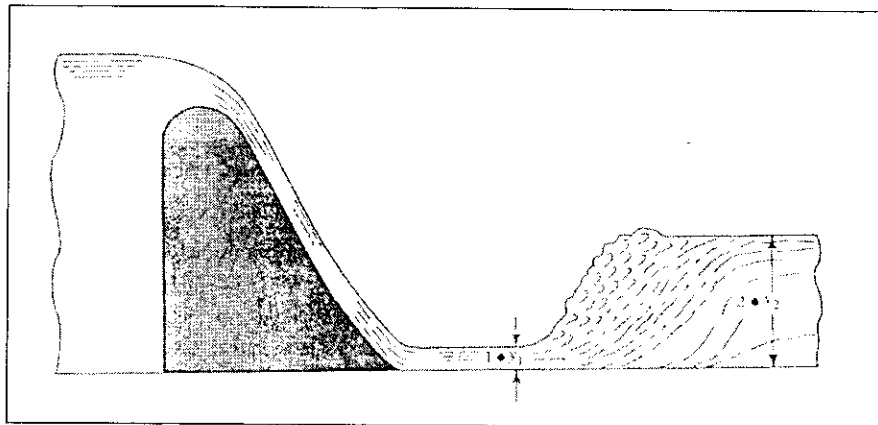
$$V = 1.00/n * R^{2/3} S^{1/2}$$

En la Figura 31 se muestra el fenómeno del salto hidráulico. Éste puede ser simulado en un canal a escala. Por medio de éste se pueden obtener datos como la velocidad antes del salto, la profundidad después del salto, la velocidad después del salto y la energía disipada después del salto.

Estos datos se pueden obtener, como ya se expuso en la parte teórica de este trabajo, por medio de las ecuaciones de la energía, la gráfica de la variación de la energía específica con la profundidad y la gráfica de las profundidades críticas y profundidades alternas.

Utilizando las ecuaciones de la energía y la continuidad se pueden también saber las características del flujo sobre una protuberancia.

**Figura 35 Salto hidráulico**



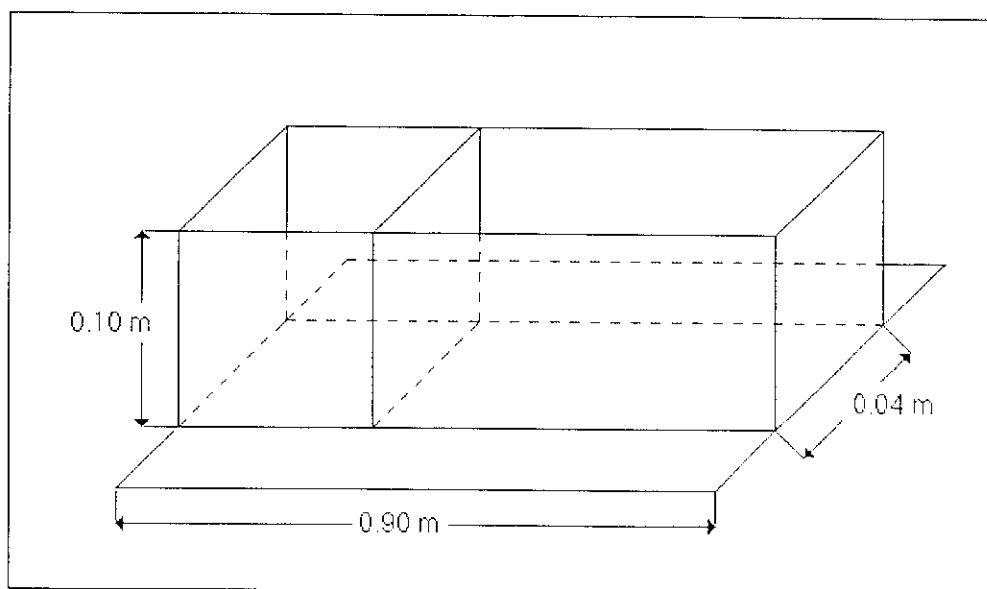
1. Objetivo. El objetivo de la práctica es el análisis de varias características del flujo en canal abierto. El primer caso es el salto hidráulico en un canal abierto. Se pretende encontrar parámetros como la velocidad antes y después del salto, la profundidad después del salto y la energía disipada. Luego se busca hallar la velocidad y altura del flujo sobre una protuberancia. Por último, medir velocidad de volumen del flujo a partir de la altura de la cresta que se forma en la parte superior de un vertedero.

2. Materiales e instrumentos. El tamaño del canal puede ser variable. Entre más grande sea el canal, más demostrativa será la práctica, además que los resultados posiblemente sean más acertados.. Los siguientes son materiales para la construcción de un canal de 1 metro de largo, 15 centímetros de ancho y 20 centímetros de largo.

- Tres planchas de vidrio o plexiglass de 0.90 m \* 0.10 m
- Una plancha de vidrio o plexiglass de 0.90 m \* 0.04 m
- Equipo para cortar el vidrio o plexiglass.
- Pegamento para vidrio o plástico.
- Una manguera de agua.
- Cronómetro.
- Un metro.
- Una cubeta con capacidad para veinte litros graduada.
- Plasticina y paletas de madera.

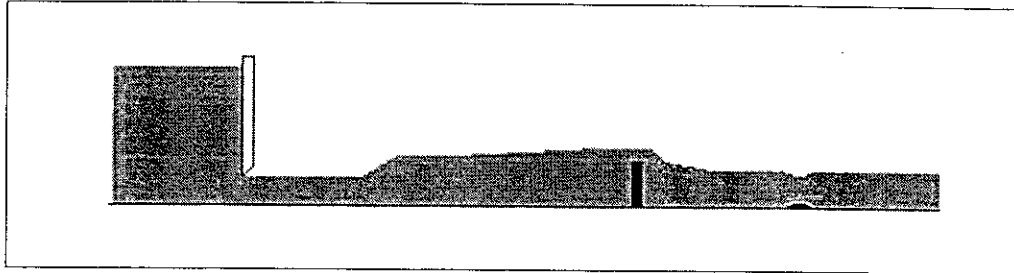
3. Procedimiento experimental. Como ya se mencionó el objeto de la práctica es el análisis del flujo en un canal abierto. Lo primero será construir el canal. La siguiente figura muestra las dimensiones del canal.

**Figura 36 Canal abierto**



En la siguiente figura se muestra una vista lateral del sistema.

**Figura 37 Perfil de canal**



Después de tener el canal ya armado, lo siguiente será construir la compuerta de la esclusa, el vertedero y la protuberancia. Para construir la compuerta de esclusa se corta un pedazo de vidrio o plexiglass de  $0.20\text{m} \times 0.04\text{m}$ . Después se pueden pegar dos paletas de forma vertical, a modo de sostener la compuerta. Luego para el vertedero se corta un pedazo de vidrio o plexiglass de  $0.02\text{m} \times 0.04\text{m}$ . Este se pega a unos 60 centímetros del extremo. Luego para la protuberancia se hace de plasticina y se adhiere a unos 75 centímetros del extremo del canal.

a. Salto hidráulico. A partir que ya está armado todo el sistema se hacen las mediciones. Comenzaremos con el salto hidráulico. Primero se necesita el caudal al cual se está descargando el agua. Para esto se conecta una manguera en el principio del canal, de modo que el nivel de agua antes de la compuerta de la esclusa se mantenga constante luego de levantar la compuerta. La esclusa debe de ser levantada siempre a una misma altura. Se deja el agua correr de modo que caiga en el cubeta graduada. Se deja llenar la cubeta durante un lapso de tiempo. Un minuto por ejemplo. A partir de esto se sabe el caudal. Se puede repetir la prueba para cerciorarce que el dato obtenido es el correcto. Luego al dejar el agua correr, se puede tomar las medidas de la altura antes del salto y la altura después del salto. También se puede tomar la distancia entre la compuerta y el principio del salto, ya que esta varía dependiendo de que tanto se levante la compuerta, pero para esta práctica, no se tiene uso alguno para ese dato. Con estos datos se puede obtener la velocidad después del salto y la energía disipada en el salto.

b. Flujo sobre una protuberancia. Para obtener datos sobre el comportamiento del flujo sobre una protuberancia, necesitamos saber la velocidad del flujo y las alturas del flujo y de la protuberancia. La altura del flujo se puede medir con la regla, al igual que la altura de la protuberancia. La velocidad del flujo se puede obtener a partir del caudal, que ya se midió en el inciso anterior, y el área transversal del flujo que se puede saber a partir del ancho del canal y la altura del flujo.

c. Medición de flujo en canal abierto. Para obtener el flujo en el canal abierto se necesita la altura de la cresta y el ancho del vertedero. Estos datos se pueden tomar al meter agua al sistema.

#### 4. Datos y cálculos

a. Salto hidráulico. Los siguientes datos se obtuvieron con los siguientes parámetros:

- Velocidad de flujo:  $8.335 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 5\text{L}/\text{min}$
- Ancho del canal:  $4.1 \text{ cm} = 0.041 \text{ m}$
- Altura del flujo antes del salto:  $0.5 \text{ cm} = 0.005 \text{ m}$

La velocidad antes del salto es:

$$v_1 = Q/A_1$$

$$A_1 = 0.041\text{m} \cdot 0.005\text{m} = 2.05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v_1 = 8.335 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} / 2.05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \mathbf{0.41 \text{ m/s}}$$

La profundidad después del salto:

$$y_2 = (y_1/2)(\text{raiz}(1+8NF_1^2)-1))$$

$$NF_1 = v_1/\text{raiz}(gy_h)$$

$$NF_1 = 0.41 \text{ m/s} / \text{raiz}(9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.005 \text{ m}) = 1.84$$

$$y_2 = (0.005\text{m}/2)(\text{raiz}(1+8 \cdot 1.84^2)-1)) = \mathbf{0.0107 \text{ m}}$$

La velocidad después del salto:

Debido a la continuidad,

$$v_2 = Q/A_2 = 8.335 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} / (0.041 \text{ m} \cdot 0.0107 \text{ m}) = \mathbf{0.189 \text{ m/s}}$$

La energía disipada en el salto:

$$\Delta E = (y_2 - y_1)^3 / (4y_1y_2) = (0.0107 \text{ m} - 0.005 \text{ m})^3 / 4 \cdot (0.0107 \text{ m} \cdot 0.005 \text{ m})$$

$$\Delta E = \mathbf{8.6538 \cdot 10^{-5} \text{ m}}$$

Esto significa que  $8.6538 \cdot 10^{-5} \text{ m}$  de energía potencial se disipa de cada newton de agua conforme ésta fluye a través del salto.

b. Flujo sobre una protuberancia

Los siguiente datos se obtuvieron con los siguientes parámetros:

- Velocidad de flujo:  $8.335 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 5\text{L}/\text{min}$
- Ancho del canal:  $4.1 \text{ cm} = 0.041 \text{ m}$
- Altura de original del flujo:  $1.1 \text{ cm} = 0.011 \text{ m}$
- Altura de la protuberancia:  $0.4 \text{ cm} = 0.004 \text{ m}$
- Altura de flujo sobre la protuberancia:  $1.0 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$

Primero se obtiene la velocidad del flujo:

$$Q = v_1 A_1$$

$$A_1 = 0.041\text{m} \cdot 0.011\text{m} = 4.51 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

$$v_1 = Q/A_1 = 8.335 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} / 4.51 \cdot 10^{-4} \text{m}^2 = 0.185 \text{ m/s}$$

De las siguientes dos ecuaciones:

$$E_1 = v_1^2/2g + y_1 = E + h = v_2^2/2g + y_2 \quad \text{o} \quad E = E_1 - h$$

$$E_1 = (0.185 \text{ m/s})^2 / 2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 + 0.011 \text{ m} = 0.0127 \text{ m}$$

$$E = 0.0127 \text{ m} - 0.004 = .0087 \text{ m}$$

Con esto se puede graficar sobre el diagrama de energía específica y encontrar el valor de la profundidad del flujo. Pero este valor también se puede medir.

De modo que el cambio en el nivel de la superficie es:

$$\Delta = y + h - y_1 = 0.010 \text{ m} + 0.004 \text{ m} - 0.011 \text{ m} = - 0.0033 \text{ m}$$

La velocidad del flujo es:

$$v_2 = v_1 \cdot (y_1/y_2) = 0.185 \text{ m/s} \cdot (0.011\text{m}/0.010\text{m}) = \mathbf{0.209\text{m/s}}$$

c. Medición de flujo

- Ancho del vertedero ( L ):  $4.1 \text{ cm} = 0.041 \text{ m}$
- Altura de la cresta (H) :  $0.7 \text{ cm} = 0.007 \text{ m}$
- Altura del vertedero (H<sub>c</sub>):  $2.0 \text{ cm} = 0.02 \text{ m}$

$$Q = (3.27 + 0.40H/H_c)LH^{3/2}$$

$$Q = (3.27 + 0.40 \cdot 0.007\text{m}/0.02\text{m})(0.041\text{m} \cdot 0.007\text{m}^{3/2}) = 8.188 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \mathbf{8.188 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 4.91 \text{ L}/\text{min}}$$

## VI. Turbinas Pelton

### A. Generalidades de Turbinas

La turbina hidráulica es una turbomáquina motora, es decir es una bomba rotodinámica que funciona a la inversa. Así como una bomba absorbe energía mecánica y le otorga energía al fluido, una turbina absorbe energía del fluido y otorga energía mecánica. Teóricamente suministrando energía hidráulica a la máquina, e invirtiendo el flujo, una bomba podría trabajar como una turbina. Prácticamente el rendimiento sería muy bajo, y a veces nulo, exceptuando las máquinas especialmente diseñadas para trabajar como bomba y como turbina, como es el caso de la máquina doble bomba-turbina que se pueden encontrar en centrales de bombeo.

Los elementos constitutivos son análogos a los de una bomba, pero dispuestos en orden inverso. La siguiente es una figura típica de una turbina.

1. Canal de llegada ( lámina libre ) o tubería forzada ( flujo a presión ).  
Corresponde a la tubería de impulsión en una bomba.
2. Caja espiral. Transforma presión en velocidad; en una bomba, velocidad en presión.
3. Distribuidor. Corresponde a la corona directriz en una bomba; pero en una turbina transforma presión en velocidad y actúa como tobera. En una bomba en cambio, actúa como difusor.
4. Rodete. A las bombas centrífugas con flujo en el rodete hacia el exterior corresponde el tipo de turbinas centrípetas con flujo en el rodete hacia el interior.
5. Tubo de aspiración. Corresponde a la tubería de aspiración de una bomba. En una turbina es el órgano de desagüe, pero se llama tubo de aspiración porque crea una aspiración o depresión a la salida del rodete; mientras que en las bombas constituye la tubería de admisión, y crea también una depresión a la entrada del rodete. Las turbinas de acción carecen de tubo de aspiración, ya que en ellas el agua sale del rodete directamente al canal de salida.

## B. Turbina Pelton

Las turbinas de impulso o de acción tienen la peculiaridad de aprovechar solamente la energía cinética del fluido, ya que no existe diferencia de presión entre la entrada y la salida de la máquina.

Entre las turbinas hidráulicas de este tipo la más representativa es la turbina Pelton. También se podría mencionar la Michell-Ossberger de chorro cruzado. Esta última es poco conocida y su empleo está limitado a pequeños aprovechamientos que están de  $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  y saltos de 12 a 50 metros.

La turbina Pelton debe su nombre a Lester Allan Pelton (1829-1908) quien buscando oro en California, concibió la idea de una rueda con cucharas periféricas que aprovechara la energía cinética de un chorro de agua, proveniente de una tubería de presión, incidiendo de forma tangencial sobre la misma. Lester Pelton con varias formas en los álabes hasta que alcanzó una patente de rueda en 1880, desde cuya fecha ha tenido gran desarrollo y aplicación.

En la turbina Pelton actual la energía cinética del agua, en forma de chorro libre, se genera en una tobera colocada al final de una tubería de presión. La tobera está provista de una válvula para regular el flujo.

Normalmente el álabe tiene la forma de doble cuchara, con una arista diametral sobre donde choca el agua, produciéndose una desviación simétrica en dirección axial, buscando un equilibrio dinámico de la máquina en esa dirección. Por ser el ataque del agua en sentido tangencial a la rueda se le denomina también turbina tangencial; por tener el fluido un recorrido axial a su paso por el álabe, se clasifica también entre las máquinas de tipo axial.

La turbina Pelton tiene aplicación en los aprovechamientos hidráulicos donde la ponderación de la carga es importante respecto al caudal.

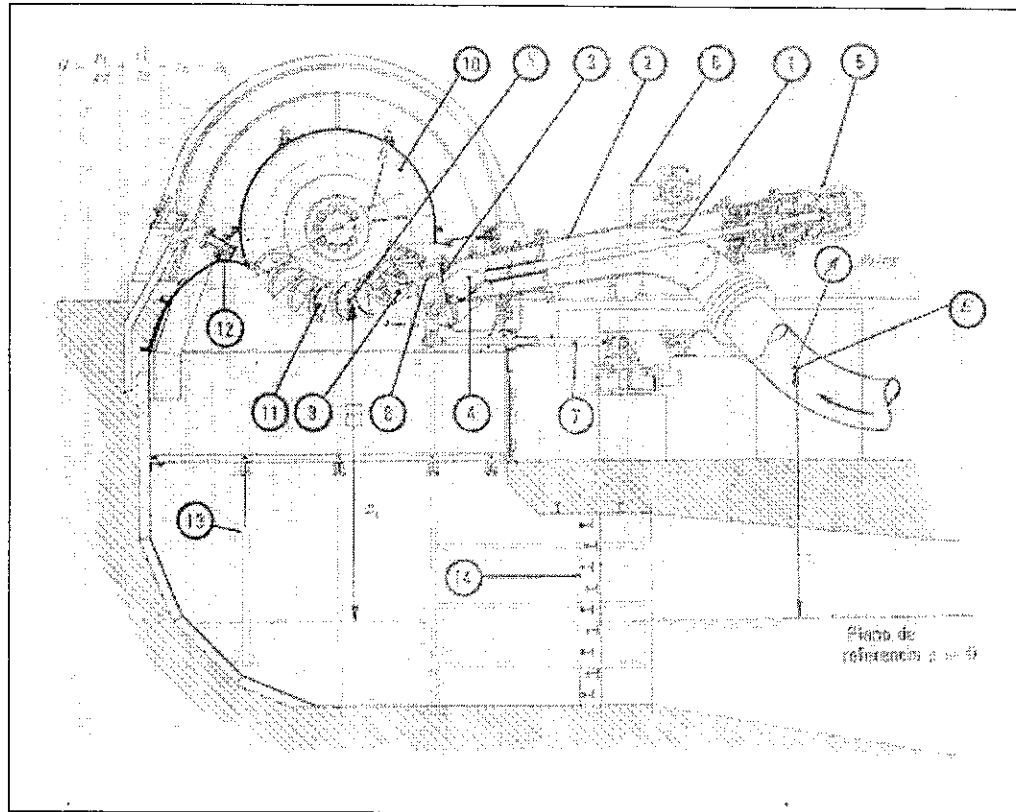
En la siguiente figura se representa una turbina Pelton construida por la casa Alsthom-Charmilles. Se trata de una Pelton doble, porque tienen dos rodetes en el mismo eje. Además tienen dos inyectores, uno por rodete. Los datos técnicos para esta turbina son los siguientes:

Altura neta =  $H = 705 \text{ m}$

$n = 750 \text{ rpm}$

$P_a = 16000 \text{ kW}$  (  $P_a = \text{Potencia en el eje o potencia útil.}$  )

**Figura 38 Turbina Pelton**

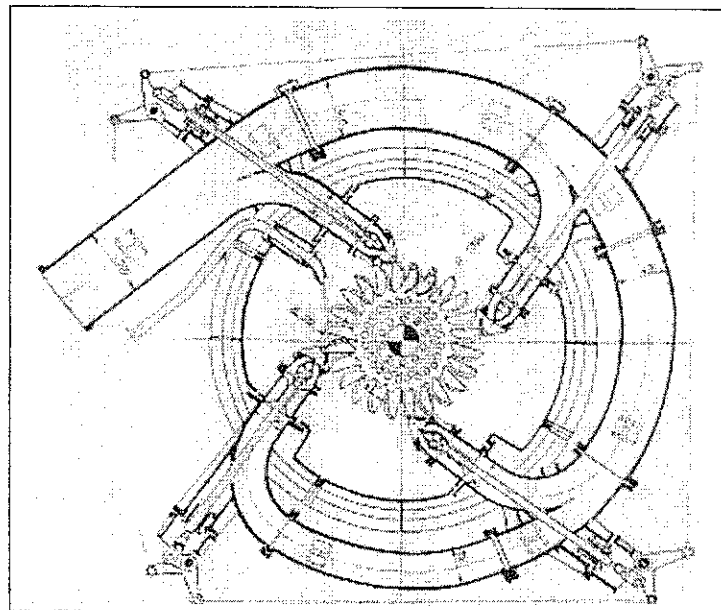


Una instalación típica de turbinas Pelton consta de los siguientes elementos.

1. Codo de entrada
2. Inyector. Es el distribuidor de las turbinas Pelton. Transforma la energía de presión del fluido en energía cinética. La velocidad del chorro a la salida del inyector en algunas instalaciones llega a  $150 \text{ m/s}$  y aún más. Consta de tobera y válvula de aguja.
3. Tobera
4. Válvula de aguja. Se desplaza longitudinalmente. Tanto la boquilla como la aguja del inyector suelen construirse de acero muy duro.
5. Servomotor. Desplaza mediante presión de aceite el aguja del inyector.
6. Regulador

7. Mando del Deflector
8. Deflector o pantalla deflectora. Sirve para evitar el golpe de ariete y el embalamiento de la turbina.
9. Chorro. En la turbina que se muestra en la figura, el diámetro máximo del chorro es 123 mm.
10. Rodete
11. Alabes o cucharas.
12. Freno de la turbina por chorro de agua. El pequeño chorro, de 25 mm de diámetro en esta caso, actúa sobre el dorso de los álabes y frena el rodete. Sin él, el rodete seguiría girando por inercia cada vez más lentamente con perjuicio de la lubricación y el deterioro de los cojinetes.
13. Blindaje. Protege la infraestructura contra el efecto destructor del chorro desviado. A veces se utilizan con el mismo fin bloques de granito.
14. Destructor de energía. Evita también las erosiones en la infraestructura.

**Figura 39 Turbina Pelton de cuatro chorros**



Las turbinas Pelton se clasifican en sencillas ( un rodete y un chorro) y múltiples. Las turbinas Pelton se multiplican por el número de chorros, llamándose Pelton doble, triple, etc. Los chorros se pueden instalar en rodetes distintos como en la Figura 39 ( Pelton doble, dos rodetes y un chorro por rodete ) o en un solo rodete como en la figura 40, construida por la casa Escher

Wyss ( Pelton cuádruple: un rodete y cuatro chorros). Las turbinas Pelton séxtuples ( un rodete de eje vertical y seis chorros ) cayeron un tiempo en desuso, por la complicación de la regulación de los chorros.

1. Turbinas pelton de eje horizontal y de eje vertical. La clasificación más general que puede hacerse de las turbinas Pelton es en tipos de eje horizontal y tipos de eje vertical. Existen otras divisiones que toman en cuenta el número de inyectores por rueda o el número de rotores montados en un mismo eje.

En la disposición de eje horizontal el número de chorros por rueda se reduce generalmente a uno o dos, por resultar complicada la instalación en plano vertical de las tuberías de alimentación y las agujas de inyección. La rueda queda, más accesible para su inspección, lo mismo que los inyectores, con lo que la reparación de averías pequeñas y desgastes por erosión pueden efectuarse sin desmontar la turbina. Encuentra así aplicación, este sistema de montaje, en aquellos casos donde se tienen aguas sucias que producen deterioros o notable acción abrasiva. Con el eje en horizontal se hace también posible instalar turbinas gemelas para un solo generador, colocado entre ambas, contrarrestando empujes axiales.

Con la disposición de eje en vertical, se facilita la colocación del sistema de alimentación en un plano horizontal, lo que permite aumentar el número de chorros por rueda. Este número va de cuatro a seis. De esta manera se puede incrementar el caudal y se tiene mayor potencia por unidad. Se acorta la longitud del eje turbina generador. Se disminuyen las excavaciones. Se puede disminuir el diámetro de la rueda y aumentar la velocidad de giro. Se reduce el peso de la turbina por unidad de potencia. Todo esto viene dando lugar a que encuentre más partidarios la disposición en vertical hoy día, a pasar de la preferencia que siempre tuvo hasta hace poco la instalación con eje horizontal. Conviene hacer notar, que con el montaje del eje en vertical, la inspección y las reparaciones se hacen más difíciles, por lo que conviene reservar esta disposición para aquellos casos en que se tengan aguas limpias que no produzcan gran efecto abrasivo sobre los álabes e inyectores; tanto más, que los álabes ya están mas sometidos a una acción más repetida del agua, al existir mayor número de chorros por rueda.

2. Características constructivas de la turbina pelton. Número de álabes. La rueda Pelton está constituida comúnmente por un disco de acero con alabes periféricos en forma de doble cuchara. Estos pueden estar fundidos en una sola pieza o individualmente, sujetándose al disco por medio de bulones.

La fundición por separado de disco y álabes ha sido la forma más tradicional, ya que no sólo se facilita la construcción ( fundición, maquinado y pulido de piezas ) sino que también hace posible la reposición de cucharas averiadas por la erosión. Sin embargo, modernamente se advierte una gran tendencia a fundir disco y álabes en una sola pieza, sobre todo cuando se trata de ruedas de alta velocidad específica. Se consigue con este procedimiento mayor rigidez y solidez uniformidad en la resistencia y montaje rápido. Para la misma potencia, las ruedas resultan más ligeras. Métodos modernos de fundición y control de calidad ( Magnaflux, Magnaglo, ultrasonidos, etcétera ) permiten obtener piezas sin grietas ni fisuras en el templado.

El material de los álabes debe resistir la fatiga, a la corrosión y a la erosión. Cuando estas acciones son moderadas puede bastar la fundición de grafito laminar. Si las condiciones de trabajo son más drásticas debe recurrirse al acero, al carbono aliado con níquel ( 0.7 a 1 ) – molibdeno ( 0.3 ). Aceros con 13 por ciento de cromo y los aceros austeno-ferríticos ( Cr 20, Ni 8, Mo 3 ) presentan una resistencia extraordinaria a la cavitación y a la absorción. El material del disco de la rueda es de acero fundido o forjado.

El número de álabes suele ser de 17 a 26 por rueda, dependiendo de la velocidad específica de la turbina. Para alta velocidad específica el número de álabes es menor. En efecto, para una rueda de diámetro determinado por una carga y una velocidad de giro, si la velocidad específica es alta es que el gasto es grande, lo que exige álabes mayores, y por tanto caben menos en la misma periferia de la rueda. En cualquier caso, el número de álabes debe ser tal que el agua proveniente del chorro no tenga lugar para pasar entre dos álabes sin acción sobre alguno de ellos. La determinación del paso se realiza con el trazado de las trayectorias relativas del agua respecto a la rueda concebida está en su plano ecuatorial geométrico.

La arista media del álabe no es completamente radial, sino que está ligeramente inclinada con relación a la dirección del chorro. El ángulo de

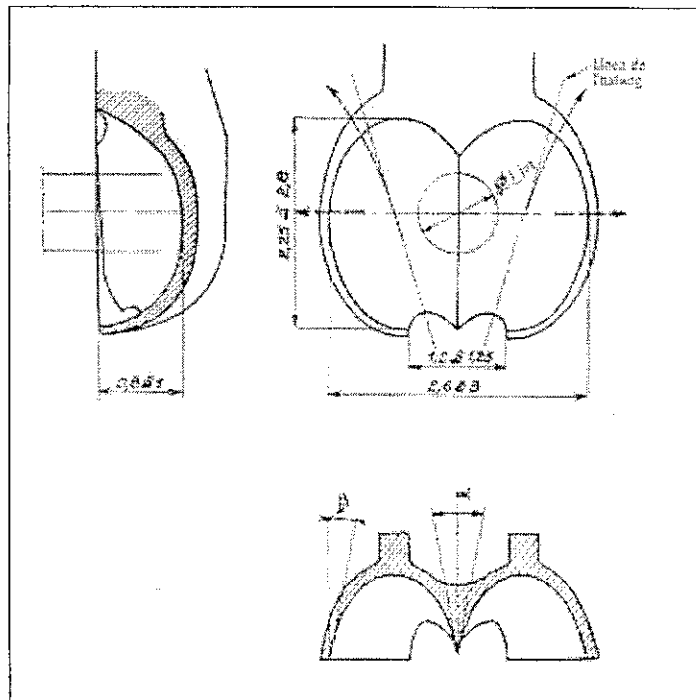
inclinación es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad específica de la turbina.

3. Forma y dimensiones de los álabes. Los álabes de una rueda Pelton tienen la forma de doble cuchara como ya se ha dicho, con una arista mediana donde se produce el ataque del chorro del agua. Las dimensiones del álabe son proporcionales al diámetro del chorro; éste a su vez es función del diámetro de la rueda y de la velocidad específica. Sería deseable que el ángulo  $\alpha$  que forma las dos caras interiores del álabe fuera cero, para evitar componentes de choque de la velocidad en la incidencia; sin embargo, esto no es posible, ya que se delibitaría demasiado la arista media, sujeta a la acción directa del chorro de agua y a los efectos no solo mecánicos sino de erosión y corrosión. El ángulo  $\alpha$  es del orden de  $20^\circ$  según recomendación de los constructores.

A la salida, el ángulo del álabe  $\beta$  está normalmente entre  $8^\circ$  y  $12^\circ$  en la parte media del álabe. También aquí convendría reducir en lo posible el valor  $\beta$  para disminuir el valor de la velocidad absoluta de salida  $V_2$  y mejorar la utilización del energía del agua, pero se presenta el peligro de recirculación y de choque del agua contra el extradós del álabe siguiente. Hay que dar salida al agua con la propio forma del borde de fuga, a la cual se le ayuda con las líneas de "thalweg" en la superficie del intradós. Esto se muestra en la siguiente figura. El diseño del álabe se realiza definiendo las líneas de nivel de la superficie activa, cuyo trazado está basado, en mucho, en la práctica y la experiencia.

Como la energía cinética del agua del chorro decrece con la distancia al orificio de salida, conviene chocar los inyectores lo más cerca posible del rodete, para lo cual se produce en los álabes una entalladura en la parte periférica, la que además impide que el agua salpique por el borde de la cuchara e incluso que la ataque por la parte posterior. En las ruedas de alta velocidad específica debe acentuarse el tamaño de la entalladura o destalonado de los álabes, por ser el caudal relativamente más abundante.

Figura 40 Geometría de cucharas



### C. Práctica 4 construcción de una turbina pelton

La construcción de una Turbina Pelton que cumpla con los requisitos de eficiencia del mercado sería muy complicada para una práctica de laboratorio. Sin embargo se puede construir una Turbina que funcione y que ayude a demostrar los conceptos básicos del funcionamiento de las turbinas. Como vimos en la parte teórica de este trabajo, las turbinas involucran muchos componentes. Se pretende construir en esta práctica una Turbina Pelton que tenga los siguientes componentes:

- Codo de entrada
- Inyector.
- Tobera
- Chorro.
- Rodete
- Alabes o cucharas.
- Blindaje

- Generador

1. Objetivo. El objetivo de la práctica es la construcción de una turbina Pelton a escala.

2. Materiales e Instrumentos. Dependerán los materiales en el tipo de turbina que se vaya a construir. A continuación se detallan los materiales utilizados para la fabricación de cada uno de los componentes.

- Codo de entrada: Se utilizó una manguera transparente de 15 mm de diámetro interno. La manguera tiene a un extremo adaptación para una manguera, y en el otro adaptación para el inyector.
- Inyector: Como inyector se utilizó un bolígrafo vacío.
- Tobera: Como tobera se utilizó el cono roscado que llevan los bolígrafos. Diámetro de salida 1.5 mm.
- Chorro: El diámetro del chorro es variable. En este caso 1.5mm.
- Rodete: Rodete de madera de madera de 7.5mm de diámetro y 2 cm de ancho.
- Alabes o cucharas: Se utilizaron alabes de metal. Doble curvatura. 3cm de largo saliente del rodete.
- Blindaje: Estructura de madera y plexiglass.
- Generador: Un motor conectado por medio de engranes al eje del rodete.
- Multitester y un led.
- Cronómetro.
- Cubeta con capacidad para 20 L graduada.

3. Procedimiento experimental. La parte más complicada de esta práctica es la construcción en si de la Turbina. Cuando ésta esté terminada, no queda más que accionarla. Se abre la válvula para dejar pasar el flujo de agua. El chorro de agua accionará el rodete y lo hará girar a gran velocidad. El rodete por consiguiente moverá al eje y el eje a los engranes y por último los engranes al motor. Como se puede ver en la figura, al motor está conectado un led, que se encenderá con la potencia generada por el motor. Al encenderse este se

comprobará la generación de energía. Se puede obtener un estimado de la energía que se está produciendo. Con el multítester se puede medir el voltaje generado y además la resistencia del led.

De la ley de Ohm sabemos que:  $V = IR$ , donde  $v$  es el voltaje,  $I$  la corriente y  $R$  la resistencia. Se sabe también que la potencia está dada por la siguiente ecuación:

$$P = I^2R.$$

Al sustituir obtenemos:

$$P = I^2R = (V/R)^2R = V^2/R$$

De este modo sólo necesitamos medir el voltaje generado por el motor y la resistencia del led. Con esto podemos obtener la potencia.

4. Datos y cálculos. Los siguientes datos fueron obtenidos con una turbina pelton fabricada con los materiales y medidas descritos anteriormente. El flujo de agua fue 5L/min.

Voltaje	0.8 V
Resistencia	30Ω

De modo que:

$$P = I^2R = (V/R)^2R = V^2/R = 2.13 \cdot 10^{-2} \text{ Watts.}$$

## VII. DISCUSIÓN

### A . Mediciones de flujo

En la práctica de mediciones de flujo se utilizó un medidor de orificio y un manómetro diferencial para medir el flujo de agua a través de una tubería de PVC con un diámetro interno de 26 mm. Se utilizaron restricciones con orificios de 10, 12 y 15 mm. Para esto se utilizó una fórmula basada en las ecuaciones de la energía y continuidad. Esta fórmula se reduce a una ecuación que tenía como incógnita el coeficiente  $C$ , que depende del número de Reynolds del flujo y de la geometría del canal. Para la obtención del número de Reynolds fue necesario considerar la viscosidad del fluido y la velocidad.

Primero fue necesario asumir un valor para número de Reynolds. Se tomó el valor de 2000, que es el límite para el flujo laminar. A partir de esto se obtiene un valor de  $C$ , conforme la gráfica y el valor de  $d/D$ . Luego con esto ya se obtiene el caudal. A partir de esto se obtuvo la velocidad del flujo y con esto un nuevo número de Reynolds. Se siguió con el mismo proceso hasta que el valor de  $C$  y el número de Reynolds no variara.

Utilizando los tres distintos tipos de orificios se obtuvo un valor para el flujo de 14.39 L/min. En sí el valor real del flujo es de 15 L/min. Puede parecer sorprendente que se hayan obtenido valores tan consistentes utilizando un artefacto "hechizo". La razón de éste es que en todos los casos el valor de  $C$  tiende a ser el mismo. Según la teoría, la disminución en el diámetro de la corriente del flujo en la vena contracta tiene a reducir el valor de  $C$ . El problema es que en una gráfica de pequeñas dimensiones es difícil determinar con exactitud el verdadero valor de  $C$ .

Sin embargo, esto demuestra que el aparato para medir el flujo de agua utilizando placas con orificios de varios diámetros y un manómetro diferencial convencional, da valores consistentes, aunque no necesariamente exactos. Las razones de esto pueden ser varias. Se podría dar el caso que se colara agua entre las placas y la superficie de la tubería debido a que el sello que forman estas no sea muy hermético. También podrían haber problemas

con la manguera que se utiliza como manómetro. Es posible que los ramificadores de presión causen alguna turbulencia en la entrada de la manguera.

## **B. Análisis de una bomba**

Para obtener la curva de funcionamiento para una bomba centrífuga de cabeza total versus capacidad se utilizó una bomba sumergible y se le hizo trabajar con salidas a distintas alturas y se le midió el flujo en intervalos de tiempo. Esto dio como resultado una curva típica para bombas centrífugas como la que se puede apreciar en la sección de datos y cálculos de esta práctica. La bomba tiene su mayor capacidad cuando la cabeza total es cero, y va disminuyendo el flujo mientras la cabeza va aumentando. La gráfica muestra el límite de la bomba, que es una altura cercana a los 3 metros.

Estos valores son distintos a los valores nominales de la bomba. La razón de esto es que la manguera que se utilizó para medir la cabeza total tienen un diámetro mayor a la salida nominal de la bomba. Esto implica un área transversal mayor que al ser multiplicada por una velocidad determinada, nos da un caudal menor.

A pesar de esto la gráfica obtenida para la cabeza total versus capacidad es bastante acertada.

## **C. Flujo en canal abierto**

La práctica del análisis del flujo en canal abierto resultó ser la que presentó más dificultades en todo el proyecto. Se inició con el análisis del salto hidráulico. En un inicio se midió la velocidad del flujo. Esto nos dio un resultado de 5L/min. A partir de esto se toma la altura del flujo antes del salto. En estas medidas son en las que se tiene problema. El problema reside en que el nivel varía mucho y es difícil determinar con exactitud cual es. En este caso el nivel debería ser parecido al nivel al cual se levanta la compuerta de la esclusa. Luego se puede tomar el valor de la profundidad después del salto. El valor varía dependiendo del nivel del agua antes de la compuerta. Fue necesario para estabilizar este nivel para que las medidas no variaran mucho. En sí el valor teórico obtenido y el valor que se tomó en el canal son muy parecidos.

Tienen una diferencia alrededor de un 3 %. La velocidad del flujo después del salto se obtuvo a partir de este valor, al igual que la energía disipada en el salto.

Luego se procedió a analizar el flujo sobre una protuberancia. Para esto se procedió primero a medir la velocidad del flujo. Luego se midió la altura original del flujo antes de la protuberancia, la altura de la protuberancia y por último la altura del flujo sobre la protuberancia. Por medio de las ecuaciones de la energía se obtuvo la altura que disminuye el flujo al pasar este sobre la protuberancia. Los resultados fueron bastante cercanos a los medidos en el canal. Aquí de nuevo se presentó el inconveniente de la variación del flujo para tomar las medidas.

Por último se procedió a realizar la medición del flujo por medio de la altura de la cresta sobre el vertedero. Para esto se necesita el ancho del vertedero, que en este caso fue el mismo ancho del canal y la altura del agua que corre sobre el vertedero, que se conoce como cresta. Los resultados obtenidos resultaron estar bastante cercanos al valor real del flujo. Nuevamente la variación se puede deber a los problemas que existen en la medición debido a la variación del nivel.

#### **D. Turbina Pelton**

La construcción de la turbina, y la comprobación que genera alguna potencia es el objetivo de esta práctica. Sin embargo se pueden medir estos valores y obtener el valor en watts que se están generando. El proyecto sirve para darse cuenta de la transformación de energía cinética a energía eléctrica.

Pretender que una turbina de una construcción como la que se utilizó sea eficiente es muy difícil. Sin embargo se pueden hacer pruebas cambiando las forma de los álabes o aumentando el número de estos. También se podría probar reduciendo los elementos de fricción en el mecanismo.

## VIII. CONCLUSIONES

Los medidores de flujo de orificio dan resultados muy consistentes. Mejorando la construcción de estos se pueden obtener resultados mucho más exactos y precisos. Con una gráfica de mayor escala donde se puedan apreciar más los valores de  $C$ , se pueden obtener valores más reales para los distintos diámetros de los orificios.

La variación del diámetro de salida en una bomba centrífuga, hace variar la curva de funcionamiento de esta. Entre mayor sea el diámetro de la tubería que se utiliza comparado con el diámetro nominal de salida de la bomba, se reduce la cabeza total que puede alcanzar la bomba. Esto se debe a que a un mayor diámetro, hay una mayor área y un mayor peso del agua.

Las características del flujo en canal abierto se mantienen aún si se prueban a escala. El salto hidráulico, el flujo sobre una protuberancia y la medición de flujo a través de la cresta que se forma sobre un vertedero son valores que se pueden obtener a partir de fórmulas resultantes de la energía y la continuidad, y que resultan ser muy cercanos a la realidad.

Se pueden hacer mejoras a una turbina pelton para tratar de mejorar la eficiencia de esta. Tales mejoras son la forma de los álabes, el número de álabes y la reducción de fricción en el mecanismo.

## **IX. BIBLIOGRAFÍA**

1. Mott, Robert L. 1996. Mecánica de fluidos aplicada. 4ª. Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. México. 580 pp.
2. Muñoz Rico, Juan Ramón. 1991. Máquinas Motrices. Prácticas de laboratorio. 1ª. Edición. Ediciones Universidad Salamanca. España. 201 pp.
3. Mataix, Claudio. 1982. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2ª. Edición. Harla. México. 660 pp.
4. Polo Encinas, Manuel. 1976. Turbomáquinas Hidráulicas. Editorial Limusa. México. 260 pp.
5. Fox, Robert W; McDonald, Alan T. 1995. Introducción a la Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. 4ª. Edición. México. 916 pp

