Mecánica de Fluidos para Sistemas de Agua por Gravedad y Bombeo

Mayo 2003

Indice

	Página
Consulta	2
Glosario	3
Introducción	4
Conceptos Generales	4
¿De dónde salió la Ecuación de la Continuidad?	6
La Ecuación de la Continuidad para tuberías de secciones múltiples	8
La Energía en un sistema perfecto: El Teorema de Bernoulli	9
Sistemas Imperfectos: Fricción y el Teorema de Bernoulli	11
Bombas y Turbinas: El Teorema de Bernoulli	12
Situaciones Típicas	
i) Flujo natural	14
ii) Flujo controlado: Válvulas abiertas	15
iii) Flujo controlado: Válvulas cerradas	16
iv) Bombeo	16
v) Ecuación general para sistemas de distribución	18
Situaciones especiales	
i) Tuberías en paralelo	20
ii) Fuentes de agua a diferentes alturas	21
Apéndices	
Energía cinética de un fluido	23
Energía potencial de un fluido	25
Pérdidas por fricción y el número de Reynolds	27
Parámetros de diseño en un sistema de agua	29
Ejemplos resueltos	
Flujo natural	21
Flujo natural con tuberías de diferentes diámetros y longitudes	23
Sistema de tomas sencillo (llaves abiertas)	26
Sistema de tomas sencillo (llaves cerradas)	28
Bombeo	29
Sistemas de distribución: La ecuación general	31
Tuberías paralelas	35
Fuentes de agua a diferentes alturas	38
Diseño de un sistema hidráulico	41

Consulta

A Hybook of Gravity-flow water Systems : Thomas D.Jordan Jnr. : Intermediate Technology Publications 1996.

Basic Engineering Sciences y Structural Engineering for Engeneer-en-Traeneng Examenations : Apfelbaum & Ottesen : Hayden Book Company 1970.

Friction loss Characterestics Chart : Porlyethylene (PE) SDR-Presión Rated Tube : PISTA & Gustavo Urbano

Glosario

Símbolo	Descripción	Unidad
a	Aceleración	Metro / Segundo ^{2}
A	Área	Metro ^{2}
A_t	Área de tubería de entrada a tanque de captación	Metro ^{2}
D	Diámetro de tubería	Metro
E	Energía	Joule
E_k	Energía Cinética	Joule
E_p	Energía Potencial	Joule
F	Fuerza	Newton
f	Coeficiente de fricción	-
f_{A-n}	Pérdida por fricción en tubería de toma	Metro
f_h	Pérdida por fricción	Metro
f_p	Pérdida por fricción (Presión)	Newton / Metro ^{2}
F_{t-A}	Pérdida por fricción en tubería de captación	Metro
g	Aceleración de la gravedad	Metro / Segundo ^{2}
h	Altura	Metro
h_A	Altura en punto A	Metro
h_B	Altura en punto B	Metro
h_n	Altura de toma *x*	Metro
h_t	Altura de tanque	Metro
I	Corriente eléctrica	Ampere
L	Longitud	Metro
L_n	Longitud de tubería en toma x	Metro
L_t	Longitud de tubería en almacenamiento	Metro
M	Masa	Kilogramo
n	Número de tomas	-
N_{RE}	Número de Reynolds	-
P	Presión	Newton / Metro ^{2}
P_A	Presión en punto A	Newton / Metro ^{2}
P_B	Presión en punto B	Newton / Metro ^{2}
P_k	Energía cinética como presión	Newton / Metro ^{2}
P_n	Presión residual en toma x	Newton / Metro ^{2}
P_p	Presión de bombeo	Newton / Metro ^{2}
P_p	Energía potencial como presión	Newton / Metro ^{2}
P_t	Presión de turbina	Newton / Metro ^{2}
Q,q	Tasa de flujo volumétrico	Metro ^{3} / Segundo
S	Distancia	Metro
t	Tiempo	Segundo
v	Velocidad	Metro / Segundo
V	Volumen	Metro ^{3}
V	Voltaje	Volt
v_A	Velocidad del agua en tubería de almacenamiento	Metro / Segundo
v_{av}	Velocidad promedio	Metro / Segundo
v_n	Velocidad del agua en tubería de toma *x*	Metro /Segundo
W	Potencia	Watt
W_e	Potencial Eléctrico	Watt
W_{In}	Energía suministrada a la bomba	Watt
W_{out}	Energía proporcionada por la bomba	Watt
γ	Eficiencia de la bomba	-
μ_k	Viscosidad cinemática	Metro ^{2} / Segundo
ρ	Densidad (ro)	Kilogramo / Metro ^{3}

Introducción

Para el diseño de sistemas de agua por gravedad existen básicamente dos ecuaciones que será necesario comprender:

1. La Ecuación de la Continuidad
2. El Teorema de Bernoulli

Con estas dos relaciones y el entendimiento de los efectos de la fricción se pueden diseñar y analizar la mayoría de los sistemas que encontraremos.

Conceptos Generales

Es importante comprender los conceptos y sus ecuaciones a partir de las cuales obtendremos la ecuación de la continuidad y el Teorema de Bernoulli, a continuación los explicaremos brevemente.

(1)

Relación	**Velocidad = Distancia recorrida / Tiempo**
Ecuación	**$v = s / t$**
Unidades	**Metros / Segundo (m / s)**

Su pongamos que soy muy rápido y puedo correr una distancia de 100 metros en solamente 10 segundos, en línea recta por supuesto, entonces podemos decir que tengo una velocidad de 100/10, o sea 10 Metros por Segundo, que también lo podemos escribir así: 10 m/s.

(2)

Relación	**Aceleración = Diferencia de Velocidad / Tiempo**
Ecuación	**$a = (v_2 - v_1) / t$**
Unidades	**Metros / Segundo ^{2} (m / s^2)**

Ahora como corro muy rápido voy a correr en una carrera, entonces estoy parado en la mera salida esperando a que empiece, podríamos decir que tengo una velocidad 0, luego suena el silbatazo y salgo pero si bien rápido y después de 2 segundos tengo una velocidad de 10 m/s, voy ganando pues, mi aceleración entonces es de (10-0)/2 = 5 metros por segundo por segundo ($a = (v_2 - v_1) / t$). Esto significa que aumento mi velocidad 5 Metros / Segundo cada segundo que pasa. Este es mi promedio de aceleración.

(3)

Relación	**Fuerza = Masa . Aceleración**
Ecuación	**$F = M \cdot a$**
Unidades	**Kilogramo Metros / Segundo ^{2} ($Kg \cdot m / s^2$) ó Newtons (N)**

Si te aviento una cubetada de agua a la cara, acá en buena onda, sentirás una fuerza cuando te pegue el agua, esto porque el agua se está desacelerando. Ahora pues si suponemos que el agua tiene una masa de 10 Kg e iba viajando a una velocidad de 5 m/s antes de que se impactara con tu cara. y desde ese momento le tomó 1 segundo para detenerse. Podríamos decir que la desaceleración del agua es de 5/1 = 5 Metros por Segundo por Segundo y así la fuerza que se te aplicó es 5 x 10 = 50 Newtons (F = M . a).

(4)

Relación	**Presión = Fuerza / Área**
Ecuación	**P = F / A**
Unidades	**Newtons / Metro ^{2} (N / m^2) ó Pascals (Pa)**

Si en el baile traigo puestos mis tenis y te piso pues te quejas, pero luego vengo con zapatos de tacón que se ven mejor y te piso otra vez, vas a sentir la diferencia en presión, o sea está bueno el baile, ¿no? Esto es porque la fuerza (que es mi peso) es la misma en ambos casos, pero el área sobre la cual se aplica es diferente, la suela del tacón es mucho más pequeña, por lo tanto la presión es mucho mayor.
Yo tengo una masa de 70 Kg, entonces mi fuerza debida a la gravedad es 70 x 9.81 = 687 Newtons. Si el área de la suela de mi tenis es de 0.0075 m^2 (75 cm^2) entonces la presión ejercida por mi pie es de 687 / 0.0075 = 91600 N/m^2 o Pa. Si el área de la suela del tacón es de 0.0001 m^2 (1cm^2) entonces la presión de ésta en tu pie será de 687 / 0.0001 = 6870000 N/m^2 o Pa. Más de 60 veces más grande ¡Es por esto que duele más!

(5)

Relación	**Densidad = Masa / volumen**
Ecuación	**r = M / V**
Unidades	**Kilogramo / Metro ^{3} (Kg / m^3)**

Una cubeta de agua y una cubeta de aire no tienen el mismo peso. Esto es porque, aunque el volumen de ambas sustancias es el mismo (una cubeta llena), el agua es más o menos 1000 veces más densa que el aire. La densidad (ρ, se pronuncia ‘ro’) es la medida de que tan cerca están acomodados los átomos o moléculas de una sustancia. La densidad del agua es 1000 Kg/m^3. Lo que significa que si tengo10 Kg de agua ocupará un volumen de 10/1000 = 0.01 m^3 o sea 10 litros.

(6)

Relación	**Energía = Fuerza . Distancia recorrida**
Ecuación	**E = F . S**
Unidades	**Newton Metros (N . m) ó Joules (J)**

Si estoy subiendo agua con una cuerda amarrada a una cubeta hasta el techo de mi casa estoy gastando energía y por eso me canso. En este caso, estoy aplicando una fuerza en contra de la fuerza de gravedad, utilizando mis brazos para levantar la cubeta a través de una distancia h, que es la altura de mi casa. Si el agua tiene una masa de 10 Kg y sabiendo que la Aceleración de la Gravedad en la tierra es 9.81 m/s/s, entonces la fuerza requerida para levantar el agua es 10 x 9.81 = 981 Newtons. Si la Altura de la casa es 10 Metros, entonces la Energía requerida para levantar la cubeta es 981 x 10 = 9810 Joules (E = F.S).

(7)

Relación	**Potencia = Energía / Tiempo**
Ecuación	**W = E / t**
Unidades	**Newton Metros / Segundo (N . m / s) ó Watt (W)**

Si levanto la misma cubeta del ejemplo anterior al techo de mi casa en 10 Segundos entonces la Potencia requerida para llevar a cabo la tarea es 9810 / 10 = 981 Watt (W = E / t).

¿De dónde salió la Ecuación de la Continuidad?

Cuenta la leyenda que había un fluido incompresible (el agua es casi incompresible) fluyendo a través de una tubería como la que se muestra en la Figura 1.

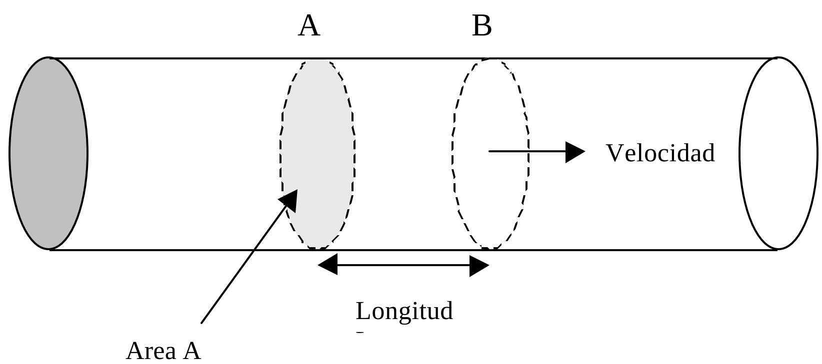

Figura 1

Y qué pasó entonces? Pues que en un Tiempo **t,** un volumen de agua de un Área **A**, y una Longitud **L** pasó por el punto **A**.

Su volumen **(V)** entonces se pudo conocer utilizando la fórmula del volumen para esta figura:

$$V = A \,.\, L$$

Después de conocer el volumen, supimos que cada segundo pasaba éste volumen por la tubería, entonces podemos ahora conocer el flujo volumétrico **Q** con la siguiente fórmula:

$$Q = V / t = A \,.\, L / t$$

Mirándolo de otra manera, también podemos decir que la Velocidad es lo mismo que la Distancia recorrida / Tiempo (ver Ecuación. 1), entonces podemos remplazar **L / t** por **v** :

$$Q = A \,.\, v \qquad (8)$$

Esta es la famosa ECUACIÓN DE FLUJO.

Ahora la leyenda cuenta que en una tubería de diferentes Áreas $\mathbf{A_1}$ y $\mathbf{A_2}$ como la que vemos en la Figura 2., el volumen de agua que entra es el mismo que el que sale...

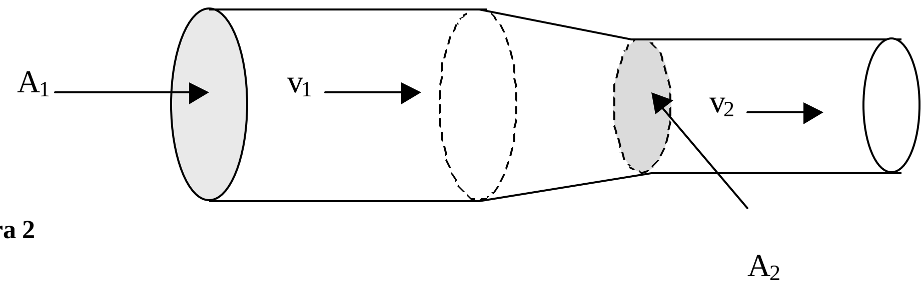

Figura 2

Por lo tanto, el flujo volumétrico (**Q**) debe ser el mismo para ambas tuberías, esto sucede porque no podemos perder ni ganar más fluido del que ya tenemos.

Por lo anterior, de la Ecuación **(8)** arriba obtenemos la siguiente ecuación:

(9)
$$\mathbf{Q = A_1 . v_1 = A_2 . v_2}$$

Ésta es la también famosa ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD y funciona para cualquier número de cambios en el diámetro de una tubería en una instalación con un flujo único.

La Ecuación de la Continuidad para Sistemas de Tuberías múltiples

Existe una regla para la circulación de flujos múltiples en fluidos incompresibles:

La suma de todos los flujos que entran **=** La suma de todos los flujos que salen

Esto se escribe matemáticamente como:

(10) $$S\ Q_{in} = S\ Q_{out}$$

Utilicemos el sistema de tuberías mostrado antes, pero ahora en vista transversal y dividiéndose en dos tuberías como en la Figura 3:

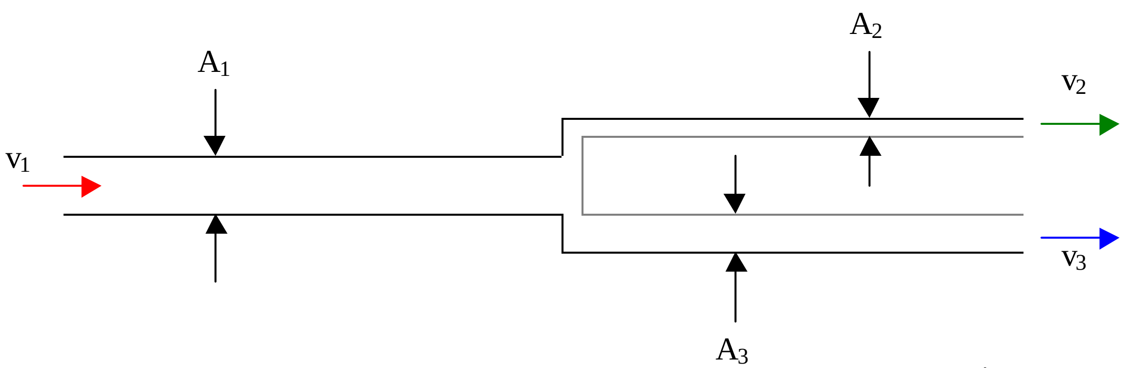

Figura 3

En éste caso el flujo que entra a la tubería se puede calcular utilizando la fórmula de arriba pero sustituyendo dentro de ésta la Ecuación de la continuidad.

$$S\ Q_{en} = A_1 v_1$$

Y el Flujo que sale por el otro lado en dos tubos se calcula de igual manera pero tomando en cuenta que se trata de dos tuberías de tamaños distintos.

$$S\ Q_{out} = A_2 v_2 + A_3 v_3$$

Por lo anterior, de la Ecuación X podemos concluir lo siguiente, que sigue siendo la ecuación de la continuidad pero aplicada a este ejemplo.

(11) $$A_1 v_1 = A_2 v_2 + A_3 v_3$$

Lo anterior es cierto para cualquier número de flujos de entrada y salida, que chido, no?.

La Energía en un Sistema Perfecto:
El Teorema de Bernoulli

En cualquier parte de un sistema perfecto, que es aquel que no sufre efecto alguno por fricción, existen siempre tres tipos energía, suponiendo que estamos usando un fluido incompresible como el agua.

Energía de Presión

Si inflas la llanta de un carro con una bomba, estás convirtiendo tu energía física de trabajo a través de la bomba en energía de presión dentro de la llanta.

Energía Cinética

Ésta es la energía contenida en un fluido en movimiento. Si estás en la playa y de repente llega una ola y te pega y te revuelca por ahí, entonces acabas de sentir la energía cinética contenida en la ola.

Energía Potencial

La fuerza de Gravedad siempre está tratando de jalar el agua hasta el punto más bajo de la superficie terrestre. Por lo tanto el agua que se encuentra en un punto alto contiene una energía que “potencialmente” puede permitirle que fluya hacia abajo o realice algún trabajo.

> En cualquier punto de un sistema perfecto la suma de estas tres “partes” de Energía en diferentes formas (Presión, Cinética y Potencial) debe ser igual a la suma de éstas tres “partes” en cualquier otra parte del sistema.

Esto se debe a que la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma. Esto es todo lo que el TEOREMA DE BERNOULLI nos demuestra.

En el Apéndice de energía cinética de un fluido se muestra la derivación de la Energía Cinética en términos de la Presión y en el apéndice de energía potencial de un fluido la derivación de la Energía Potencial en términos de la Presión.

En el Teorema de Bernoulli, cuando hablamos de un sistema perfecto, o sea en el que no existe la fricción, se expresan matemáticamente estas tres diferentes formas de Energía como Presiones como se muestra en la siguiente fórmula:

(12) $$P_1 + \tfrac{1}{2} . r . v_1^2 + r . g . h_1 = P_2 + \tfrac{1}{2} . r . v_2^2 + r . g . h_2$$

Energía de Presión como Presión en el punto 1

Energía Cinética como Presión en el punto 1

Energía Potencial como Presión en el punto 1

Los términos en el lado izquierdo de la Ecuación son:

P_1	Es la Energía de Presión en el punto 1 (expresada como Presión).	[las unidades son N/m^2 ó Pa]
r	Es la densidad del fluido.	[las unidades son Kg/m^3]
v_1	Es la Velocidad del fluido en el Punto 1.	[las unidades son m/s]
g	Es la Aceleración de la gravedad (9.81 m/s/s).	[las unidades son m/s/s]
h_1	Es la Altura (obtenida de un dato dado) del fluido en el Punto 1.	[las unidades son m]

Los términos en el lado derecho de la Ecuación son exactamente iguales, solamente que en el lado derecho del signo igual nos estamos refiriendo al Punto 2.

El lado izquierdo de la Ecuación representa todas las “partes” de Energía (expresada como Presiones) en un punto 1 en un sistema perfecto y en el lado derecho se representan todas las “partes” de Energía (expresada como Presiones) para el punto 2.

En otras palabras, el Teorema de Bernoulli compara la energía en tres diferentes formas de un punto del sistema con otro punto del sistema. Estos puntos pueden ser cualquiera que se quiera.

Sistemas Imperfectos:
La fricción y el Teorema de Bernoulli

Claro que en el mundo real los sistemas no son perfectos, como ya sabemos por experiencia, verdad?
La Energía en un sistema real se "pierde" en forma de fricción. Esto lo podemos notar por el sonido y el calor generado por el fluido en su paso por la tubería. Estas formas de Energía se "pierden" por el rozamiento del fluido contra las paredes de la tubería, rozando entre ellas mismas y por la turbulencia en el flujo. La cantidad de la pérdida por fricción se ve afectada por los siguientes parámetros:

La **Longitud** de la tubería.	Entre más largas sean las tuberías mayores serán las pérdidas por fricción.
La **aspereza** de las paredes de la tubería.	Entre más suave sea la superficie de la tubería menores serán las pérdidas por fricción.
El **Diámetro** de la tubería.	Entre más pequeño sea el diámetro de la tubería mayor será la pérdida por fricción.
La **Velocidad** del fluido.	Entre más alta sea la velocidad del fluido, mayor es la pérdida por fricción.
El **tipo de Flujo** del fluido.	Un flujo turbulento causará mayores pérdidas por fricción que un flujo laminar.
Cambios en la **forma** o **sección** de una tubería.	Accesorios, válvulas, codos, etc. Todo aumenta las pérdidas por fricción.

Las Pérdidas por Fricción no son lineares. Esto significa que si se duplica alguno de los parámetros anteriores, las pérdidas por Fricción pueden triplicarse o incluso cuadruplicarse. Por otra parte, si no hay flujo entonces no hay pérdidas por fricción. El Apéndice referente a pérdidas por fricción da una explicación más completa de la relación entre las variables anteriores.

La Fricción se incluye como un término dentro del Teorema de Bernoulli. La vamos a ubicar generalmente en el lado derecho porque representa una fracción del total de la energía en un punto del sistema, esto aunque en realidad se trata de energía que se ha ido perdiendo en el transcurso entre los dos puntos. La Ecuación **(13)** muestra el Teorema de Bernoulli incluyendo el término de fricción expresado como Presión (f_p)

(13) $$P_1 + ½ \cdot r \cdot v_1^2 + r \cdot g \cdot h_1 = P_2 + ½ \cdot r \cdot v_2^2 + r \cdot g \cdot h_2 + f_p$$

En la práctica, la Pérdida por Fricción (f_h) se calcula de acuerdo a tablas donde se especifican el tipo de tubería, el material del que está hecho, el coeficiente de fricción del material, diámetro, longitud y la cantidad de flujo. La pérdida por fricción se puede convertir a pérdida de fricción expresada como presión por medio de la siguiente relación:

(14) $$f_p = f_h \cdot r \cdot g$$

Entonces la Ecuación (13) se escribe de otra manera:

(15) $$P_1 + ½ \cdot r \cdot v_1^2 + r \cdot g \cdot h_1 = P_2 + ½ \cdot r \cdot v_2^2 + r \cdot g \cdot h_2 + f_h \cdot r \cdot g$$

Bombas y Turbinas en el Teorema de Bernoulli

Una bomba, en pocas palabras, es un elemento que provee de Energía a un sistema, mientras que una turbina toma energía del sistema para luego transformarla. Es por lo anterior que en el Teorema de Bernoulli la presión de la Bomba **(P_p)** se encuentra generalmente al lado izquierdo de la ecuación, y la presión de la turbina **(P_t)** se encuentra del lado derecho. Entonces para un sistema que contenga una Bomba y una turbina el teorema de Bernoulli se escribe de la siguiente manera:

(16)
$$P_1 + \tfrac{1}{2} . r . v_1^2 + r . g . h_1 + P_p = P_2 + \tfrac{1}{2} . r . v_2^2 + r . g . h_2 + f_h . r . g + P_t$$

Si conocemos la potencia (W_{out}) producida por la Bomba, entonces podemos calcular la presión que representa (P_p).

Tomando las Ecuaciones **(6)** y **(7)**

$$W_{out} = F . S / t$$

Y Sustituyéndolas dentro de la Ecuación **(1)** obtenemos la siguiente ecuación:

$$v = S / t$$

También podemos expresarlo de la siguiente manera:

(17)
$$W_{out} = F . v$$

Ahora, tomando en cuenta la Ecuación **(4)** $P = F / A$ despejando $F = P . A$

Combinando esto con la Ecuación **(17)** nos vuelve a dar otra forma de expresar la misma ecuación:

$$W_{out} = P . A . v$$

Sustituyendo de la Ecuación **(8)** $Q = A . v$

Obtenemos la siguiente ecuación: $W_{out} = P . Q$

Después de tanto rollo, podemos concluir que la energía obtenida por la Bomba en forma de Presión (P_p) está expresada por la siguiente ecuación:

(18)
$$P_p = W_{out} / Q$$

Las Bombas en la realidad tienen una Eficiencia (**g**) que es la relación entre la Potencia de salida (**W_{out}**) con la Potencia de entrada (**W_{in}**). Esto representa las pérdidas dentro de la Bomba debidas a la fricción y la eficiencia eléctrica. Esto se expresa generalmente en forma de un porcentaje y siempre será menor al 100%. Esto tiene que ser aplicado a la Ecuación en forma de fracción. Con lo cual nos da:

(19) $$W_{out} = W_{en} \,.\, g$$

Combinando las Ecuaciones **(18)** y **(19)** nos da otra ecuación:

(20) $$P_p = W_{in} \,.\, g \,/\, Q$$

La ecuación anterior puede substituirse dentro del Teorema de Bernoulli **(16)** y nos permitirá determinar la potencia de la Bomba requerida o en su defecto, el flujo que nos dará una potencia de Bombeo dada.

El Análisis de turbinas no será tratado aquí en detalle pero es muy similar al de las Bombas pero en sentido contrario ya que la turbina lo que hace es tomar una parte de la energía del sistema.

Situaciones Típicas

i) Flujo Natural

Supongamos que el flujo entre dos tanques a distintas alturas no está restringido o sea que no tiene válvulas de control de flujo, nos encontramos con una situación mundialmente conocida como “Flujo natural”. Esto significa que el flujo del agua irá aumentando hasta que las pérdidas de energía por fricción en combinación con la Energía Cinética sean exactamente iguales a la energía potencial del agua en el tanque que está más arriba, algo así como que se equilibran. Bien fácil ¿verdad?

En la Figura 4 se muestra una situación que es muy común para el flujo de un tanque de captación a un tanque de almacenamiento:

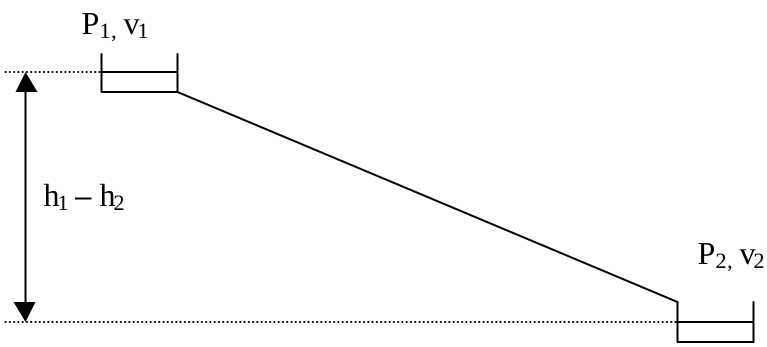

Figura 4

Apliquemos el Teorema de Bernoulli tomando como punto 1 el tanque de arriba y punto 2 el tanque de abajo:

$$P_1 + \tfrac{1}{2} . r . v_1^2 + r . g . h_1 = P_2 + \tfrac{1}{2} . r . v_2^2 + r . g . h_2 + f_h . r \, g$$

Los puntos que hay que remarcar en este ejemplo son los siguientes:

a) Los términos de energía de presión son iguales en ambos tanques $(P_1 = P_2)$ esto es porque los dos tanques están sometidos a la presión atmosférica, por lo tanto podemos eliminarlos de ambos lados de la ecuación.
b) La Velocidad del agua en el tanque de arriba es igual a cero $(v_1 = 0)$, por lo que el término que se refiere a la energía Cinética para el tanque de arriba también puede ser eliminado.

La Ecuación se simplificará como se muestra a continuación y es válida para situaciones de flujo natural típicas:

$$r . g . h_1 - r . g . h_2 = \tfrac{1}{2} . r . v_2^2 + f_h . r \, g$$

La ecuación anterior nos esta diciendo que la energía potencial del agua en el tanque de arriba se convertirá en una cantidad exactamente igual de energía cinética y fricción, será...

En la práctica (como se muestra en los ejemplos resueltos) para calcular la velocidad del flujo natural se requiere de una **iteración**, que es la repetición de un cálculo matemático.

Una situación de flujo natural más complicada ocurre cuando utilizamos tuberías de diferentes diámetros para hacer llegar el flujo al tanque de almacenamiento. En este caso un proceso similar al de arriba se aplica a cada tubería. Podemos utilizar el mentado Teorema de Bernoulli, combinándolo con otras ecuaciones, solamente hay que sustituir, despejar y simplificar para producir una ecuación que contenga ambos términos de fricción. Después de esto y por fallo y acierto encontramos una solución con las tablas de fricción.
En los Ejemplos resueltos se muestra la solución a un problema de esta naturaleza.

ii) Flujo Controlado: Válvulas Abiertas

Existen muchas situaciones en que el flujo dentro de un sistema es controlado por medio de válvulas. (particularmente en redes de distribución, tomas, etc.). En estas situaciones, a diferencia del flujo natural, existe aún una presión residual o sobrante en las tuberías justo antes de la válvula de control. Esto pasa porque se limita el flujo, lo que no permite que se queme toda la energía potencial en forma de fricción y energía cinética. La válvula de control hace el trabajo, quemando la presión residual como energía de fricción.

La Figura 5 nos muestra un escenario típico con un tanque de almacenamiento, una válvula de control y una toma:

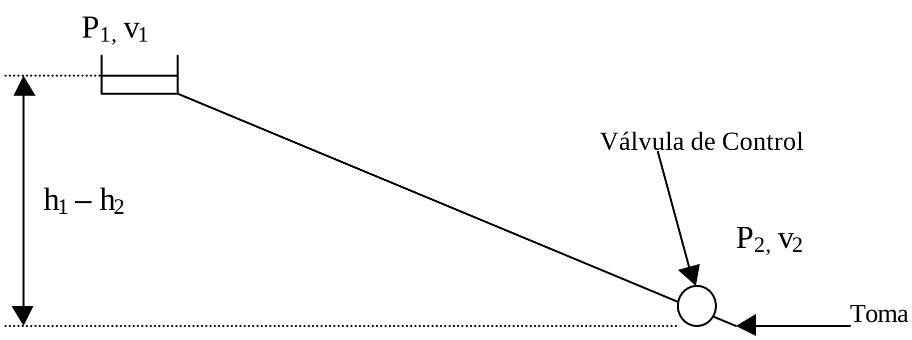

Figura 5.

Apliquemos el mentado Teorema de Bernoulli a este ejemplo:

$$P_1 + ½ . r . v_1^2 + r . g . h_1 = P_2 + ½ . r . v_2^2 + r . g . h_2 + f_h . r . g$$

Los puntos que hay que resaltar en esta situación son los siguientes:

a) La velocidad del agua en el tanque de arriba es igual a cero **($v_1 = 0$)**, por lo que eliminaremos el término referente a la energía cinética para el tanque de arriba.
b) La diferencia entre los dos términos de presión **($P_2 - P_1$)** será la presión residual en la válvula.

Una vez aclarados los puntos, despejamos y simplificamos la ecuación para que nos dé una ecuación que es muy común para situaciones de Flujo controlado:

$$\mathbf{P_2 - P_1 = \quad r \,.\, g \,.\, h_1 - r \,.\, g \,.\, h_2 - ½ \,.\, r \,.\, v_2^2 - f_h \,.\, r \,.\, g}$$

Conoceremos el valor del flujo en la medida que lo vayamos controlando. Tomando en cuenta esto y utilizando la Ecuación de Flujo (8) podemos calcular la Velocidad del agua ($\mathbf{v_2}$). Esto nos va a permitir calcular la Pérdida por fricción ($\mathbf{f_h}$), utilizando las tablas. En este momento tenemos todas las variables en el lado derecho de nuestra ecuación y podemos calcular la presión sobrante ($\mathbf{P_2 - P_1}$).

El Ejemplo 3 nos muestra este proceso en más detalle.

iii) Flujo Controlado: Válvulas cerradas

Utilicemos el ejemplo anterior, pero esta vez vamos a cerrar totalmente la válvula de control. No hay Flujo.

$$\mathbf{P_1 + ½ \,.\, r \,.\, v_1^2 + r \,.\, g \,.\, h_1 = P_2 + ½ \,.\, r \,.\, v_2^2 + r \,.\, g \,.\, h_2 + f_h \,.\, r \,.\, g}$$

Los puntos importantes a considerar con respecto al Teorema de Bernoulli son los siguientes:

a) Todos los términos de velocidad son iguales a cero $\mathbf{(v_1 = v_2 = 0)}$, por lo que desaparecen todos los términos referentes a la energía cinética.
b) No hay Flujo por lo que no existen las pérdidas por fricción $\mathbf{(f_h = 0)}$.

Después de haber visto lo anterior, el Teorema de Bernoulli se reduce para darnos una ecuacioncita que es típica para casos en el que todas las válvulas están cerradas:

$$\mathbf{P_2 - P_1 = r \,.\, g \,.\, h_1 - r \,.\, g \,.\, h_2}$$

Este es el momento en el sistema en el que la presión en la válvula alcanzará su máximo nivel y debe considerarse para el diseño y las especificaciones de la tubería que se van a utilizar.

El Ejemplo Resuelto 4 muestra los cálculos necesarios.

iv) Bombeo

Veamos ahora un caso en el que se necesita de una bomba yucateca para llevar el agua de un tanque a otro en una altura mayor.

La Figura 6 nos muestra esta situación.

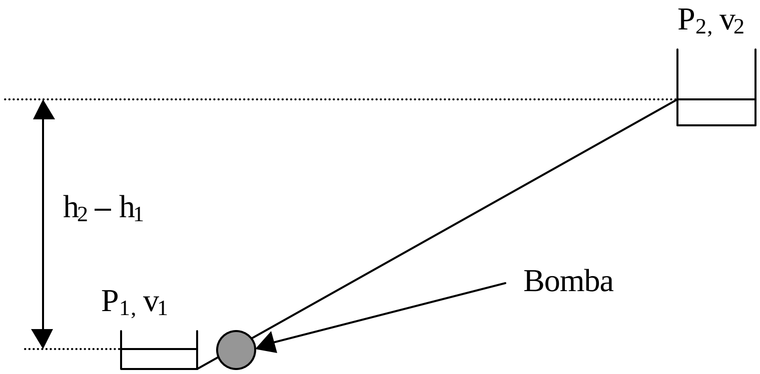

Figura 6

En esta situación lo que nos interesa es la potencia que requiere la bomba. Conocemos el flujo requerido **(Q)** y escogemos un tamaño de tubería **(A)**. Este ejercicio podemos realizarlo con diferentes tamaños de tubería para determinar los cambios en los requerimientos de la potencia del equipo de bombeo.

Apliquemos el teorema de Bernoulli a esta situación entre los dos tanques (tomamos la ecuación **(16)** de la sección 7):

$$P_1 + \tfrac{1}{2} \cdot r \cdot v_1^2 + r \cdot g \cdot h_1 + P_p = P_2 + \tfrac{1}{2} \cdot r \cdot v_2^2 + r \cdot g \cdot h_2 + f_h \cdot r \cdot g$$

Los puntos que hay que resaltar en esta situación son los siguientes:

a) La velocidad del agua en el tanque de abajo es igual a cero **($v_1 = 0$)**, entonces podemos eliminar el término de energía cinética para este tanque.
b) El requerimiento de presión de la bomba se expresa como el término **P_p** .
c) Los términos referentes a la energía por presión son iguales en cada tanque **($P_1 = P_2$)** porque ambos están sometidos a la presión atmosférica, por lo tanto los eliminaremos.

Entonces podemos rescribir la ecuación y nos quedaría lo siguiente:

$$r \cdot g \cdot h_1 + P_p = \tfrac{1}{2} \cdot r \cdot v_2^2 + r \cdot g \cdot h_2 + f_h \cdot r \cdot g$$

Esto lo podemos acomodar para que nos dé los requerimientos de presión de la bomba:

$$P_p = \tfrac{1}{2} \cdot r \cdot v_2^2 + r \cdot g \cdot h_2 - r \cdot g \cdot h_1 + f_h \cdot r \cdot g$$

Ahora conocemos **Q**, entonces a partir de la ecuación de flujo podemos calcular **v_2**.con este término podemos calcular la pérdida por fricción **f_h**. Para que ahora sí podamos calcular los requerimientos de presión de la bomba **P_p.**

Ahora, tomando la ecuación **(20)** de la sección 7: $\mathbf{P_p = W_{in} \cdot g \;/\; Q}$

Y conociendo el flujo **Q** y la eficiencia de la bomba **g**, podemos calcular $\mathbf{W_{in}}$ de la siguiente manera:

$$\mathbf{W_{in} = P_p \cdot Q \,/\, g}$$

Esta es la potencia en Watt que se le debe suministrar a la bomba $\mathbf{(W_{in})}$.

En caso de que no conozcamos la eficiencia de la bomba, asumiremos que es igual a 1 (en la práctica casi siempre es menor que 1). La ecuación nos dará entonces la potencia suministrada por la bomba $\mathbf{(W_{out})}$.

Como una aclaración mencionaremos que la potencia suministrada a la bomba es $\mathbf{(W_{in})}$ es igual a la potencia eléctrica suministrada. La potencia eléctrica $\mathbf{(W_e)}$ se calcula con la siguiente ecuación:

(21) $$\mathbf{W_e = I \cdot V}$$

Donde **I** es la corriente (en Amperes) y **V** es el voltaje (en Volts). Normalmente se conoce el voltaje (los cables de corriente en México traen 110V aprox. y los acumuladores de carro traen 12V) por lo que se puede calcular la corriente requerida. Esto es muy útil a la hora de especificar los controladores, cables y fusibles.

En el Ejemplo 5 se trata el cálculo de un sistema por bombeo.

v) Ecuación general para sistemas de distribución

En la mayoría de los sistemas de agua por gravedad lo que tenemos es un tanque de almacenamiento del cual surtimos agua a las tomas en diferentes partes de la comunidad. En la Figura 7 se muestra una red de distribución donde una tubería se divide en un punto (**punto A**) del cual salen las tuberías que llegan a cada llave.

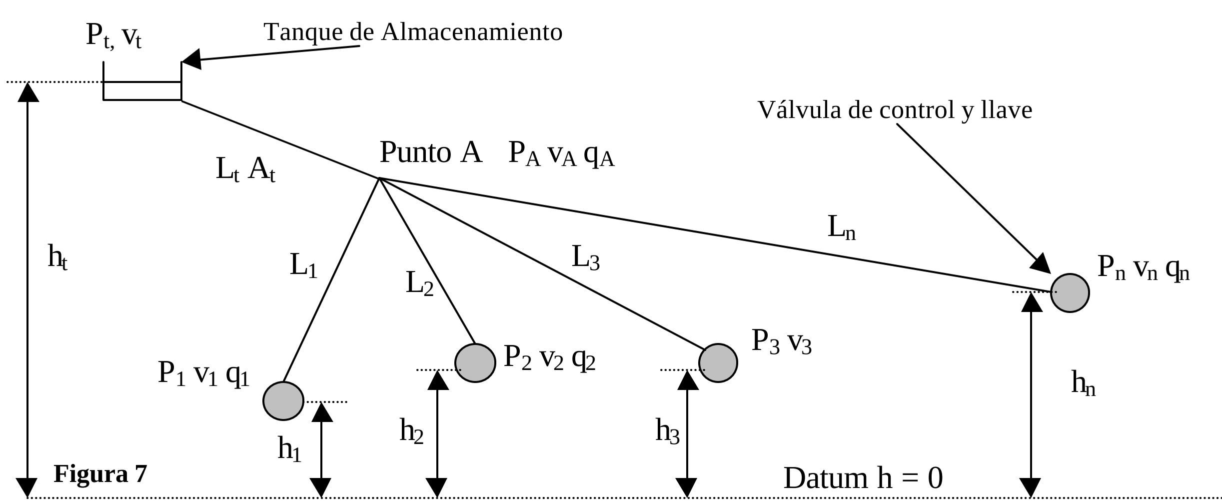

Figura 7

Si conocemos la demanda de flujo en cada llave **(q)** y conocemos el número de tomas **(n)**, entonces utilizando la ecuación de la continuidad **(11)** :

$$q_A = q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n = n \,.\, q$$

podemos decir que en el punto A:

$$n \,.\, q = A_t \,.\, v_A \qquad \text{despejando} \qquad v_A = n \,.\, q \,/\, A_t$$

Ahora vamos a utilizar Bernoulli del tanque de almacenamiento al punto A :

$$P_t + \tfrac{1}{2} \,.\, \rho \,.\, v_t^2 + \rho \,.\, g \,.\, h_t = P_A + \tfrac{1}{2} \,.\, \rho \,.\, v_A^2 + \rho \,.\, g \,.\, h_A + f_{t\text{-}A} \,.\, \rho \,.\, g$$

a) La presión de energía en el tanque de almacenamiento es igual a cero **(P_t = 0)** porque está sometido a la presión atmosférica.
b) La velocidad del agua en el tanque de captación es igual a cero **(v_t = 0)**, entonces también eliminamos la energía cinética.

Entonces Bernoulli nos queda después de despejar el Punto A **(P_A)**:

$$P_A = \rho \,.\, g \,.\, h_t - \rho \,.\, g \,.\, h_A - \tfrac{1}{2} \,.\, \rho \,.\, v_A^2 - f_{t\text{-}A} \,.\, \rho \,.\, g$$

Bernoulli del punto A a cualquiera de las llaves se ve así:

$$P_A + \tfrac{1}{2} \,.\, \rho \,.\, v_n^2 + \rho \,.\, g \,.\, h_A = P_n + \tfrac{1}{2} \,.\, \rho \,.\, v_n^2 + \rho \,.\, g \,.\, h_n + f_{A\text{-}n} \,.\, \rho \,.\, g$$

Simplificamos:

$$P_n = P_A + \rho \,.\, g \,.\, h_A - \rho \,.\, g \,.\, h_n - f_{A\text{-}n} \,.\, \rho \,.\, g$$

Substituimos la ecuación para el Punto A **(P_A)** en esta ecuación y luego simplificamos:

$$P_n = \rho \,.\, g \,.\, h_t - \rho \,.\, g \,.\, h_n - f_{t\text{-}A} \,.\, \rho \,.\, g - f_{A\text{-}n} \,.\, \rho \,.\, g - \tfrac{1}{2} \,.\, \rho \,.\, v_A^2$$

Lo dividimos entre **p.g** para convertirlo en altura:

$$(22) \qquad P_n / p \cdot g = h_t - h_n - f_{t\text{-}A} - f_{A\text{-}n} - ½ \cdot v_A^2 / g$$

Lo que nos queda después de tanto desmadre es la condenada Ecuación General para cualquier llave en un sistema de distribución. Este bicho raro nos permite calcular dos cosas:

a) Si conocemos los tamaños de las tuberías del tanque y las llaves podemos calcular la presión sobrante en la llave **($P_n / p \cdot g$)**.
b) O si sabemos cual es la presión sobrante que queremos en las llaves, podemos diseñar el tamaño de la tubería.

El Ejemplo resuelto 6 nos muestra todo este rollo en más detalle.

Situaciones Especiales

i) Tuberías en paralelo

La Figura 8 nos muestra una red donde la alimentación **Tubería (1)** se divide en el **punto A** en dos tuberías: **Tubería (2)** y **Tubería (3)** de diferentes diámetros y luego se vuelven a juntar en el **punto B** para terminar en la **Tubería (4)**.

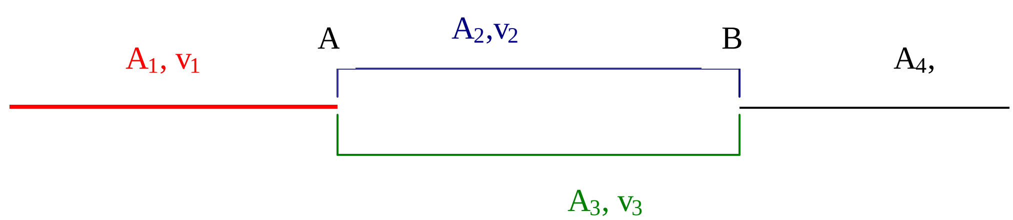

Figura 8

Hay dos puntos importantes que remarcar:

a) El flujo de entrada debe ser igual al flujo de salida (ver la ecuación **(11)** en la Sección 4), por lo que podemos decir que:

$$\mathbf{A_1v_1 = A_2v_2 + A_3v_3 = A_4v_4}$$

b) La caída de presión entre los puntos **A** y **B** en la **tubería 2** debe ser igual a la caída de presión entre los puntos **A** y **B** en la **tubería 3**. Esto es porque debe haber una continuidad de presión en el **punto B**. Así que si escribimos Bernoulli entre los puntos **A** y **B** para cada tubería (2 y 3) esto es lo que obtendríamos:

Para la Tubería 2:

$$P_A + \tfrac{1}{2} \, . \, \rho \, . \, v_2^2 + \rho \, . \, g \, . \, h_A = P_B + \tfrac{1}{2} \, . \, \rho \, . \, v_2^2 + \rho \, . \, g \, . \, h_B + f_{h2} \, . \, \rho \, . \, g$$

Para la Tubería 3:

$$P_A + \tfrac{1}{2} \, . \, \rho \, . \, v_3^2 + \rho \, . \, g.h_A = P_B + \tfrac{1}{2} \, . \, \rho \, . \, v_3^2 + \rho \, . \, g \, . \, h_B + f_{h3} \, . \, \rho \, . \, g$$

Examinando y simplificando estas dos ecuaciones observamos que la pérdida por fricción en ambas debe ser igual:

$$f_{h2} = f_{h3}$$

Conociendo estas dos relaciones en a) y b) es posible calcular las velocidades en las tuberías 2 y 3 por acierto y error (usando las tablas de fricción) y posteriormente la caída de presión entre A y B.

En el Ejemplo 7 se tratan los cálculos para tuberías paralelas.

ii) Fuentes de agua en distintas alturas

Consideremos la Figura 9, en donde encontramos dos fuentes de agua a diferentes alturas unidas en el **punto A**, de donde se conduce el agua a un tanque de almacenamiento en **B**.

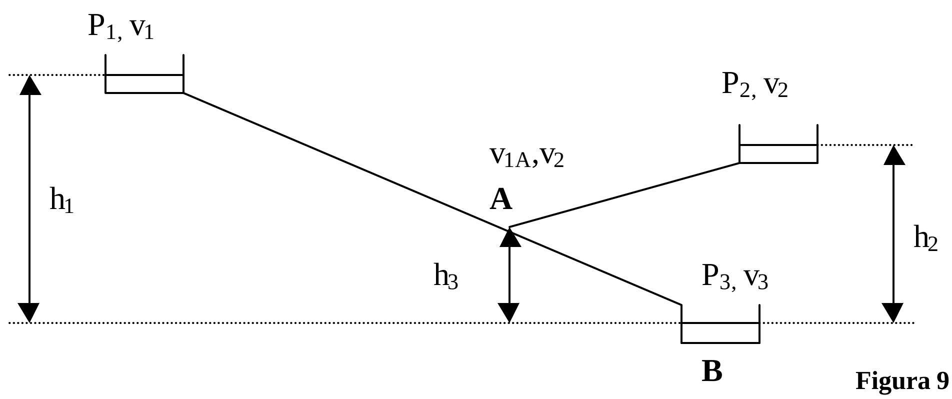

Figura 9

Aquí los puntos que hay que notar son:

a) Las presiones (P_1, P_2, P_3) en los tres tanques son iguales (atmosférica).
b) La Presión en el punto A (P_A) es la misma para las tres tuberías.
c) La velocidad del agua en los dos tanques de arriba es igual a cero $(v_1 = v_2 = 0)$, entonces desaparece la energía cinética para éstos.

En este caso el problema está generalmente en diseñar una de las líneas de conducción de tal manera que la presión en el punto A se iguale. Si la presión no se iguala en el diseño entonces los flujos interferirán entre sí.

Asumimos que conocemos los flujos de cada fuente por lo que v_{1A} y v_{2A} están determinados.

La ecuación de Bernoulli para ambas fuentes se mira así:

Para la fuente 1: $$r \,.\, g \,.\, h_1 = P_A + ½ \,.\, r \,.\, v_{1A}^2 + r \,.\, g \,.\, h_3 + f_{h1\text{-}A} \,.\, r \,.\, g$$

Para la fuente 2 : $$r \,.\, g \,.\, h_2 = P_A + ½ \,.\, r \,.\, v_{2A}^2 + r \,.\, g \,.\, h_3 + f_{h2\text{-}A} \,.\, r \,.\, g$$

Para la fuente 1 se puede calcular la presión en la unión despejando la ecuación:

Para la fuente 1 : $$P_A = r \,.\, g \,.\, h_1 + ½ \,.\, r \,.\, v_{1A}^2 + r \,.\, g \,.\, h_3 + f_{h1\text{-}A} \,.\, r \,.\, g$$

Una vez conociendo la presión en el punto A **(P_A)** podemos calcular el tamaño de tubería que necesitaremos para quemar la cantidad necesaria de altura por fricción para equilibrar las presiones en la unión.

Utilizando la ecuación de la continuidad **(11)** podemos calcular el flujo combinado de las dos fuentes.

$$A_3 v_{3A} = A_1 v_{1A} + A_2 v_{2A}$$

Ahora podemos usar Bernoulli de la unión al tanque de almacenamiento:

$$P_A + ½ \,.\, r \,.\, v_{3A}^2 + r \,.\, g \,.\, h_3 = P_3 + ½ \,.\, r \,.\, v_3^2 + f_{hA\text{-}3} \,.\, r \,.\, g$$

Si asumimos que $v_{3A} = v_3$ (o sea que hay una válvula de control en el tanque de almacenamiento), entonces podemos calcular la presión sobrante en la válvula o el tamaño de tubería requerido para reducir esta presión sobrante lo más cercano a cero (el tamaño más pequeño de tubería posible).

En condiciones de flujo natural los cálculos se vuelven demasiado complicados para tratarse en este documento.

El Ejemplo 8 trata los cálculos para fuentes en distintas alturas

Apéndices

Energía Cinética de un Fluido

Con un toque de imaginación bien chido veamos un cilindro con cierto fluido viajando a una velocidad (v) como se muestra en la Figura 10.

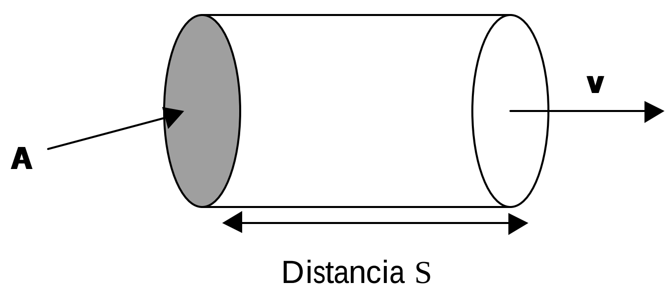

Figura 10.

Este cuerpo contiene energía cinética (energía de movimiento). Si imaginamos que hacemos algo para hacer que este cuerpo quede en reposo, entonces lo que está pasando es que la energía cinética se transformará en otro tipo de energía.

¿Cuál es la fuerza requerida para hacer que este cuerpo quede en reposo?

De la ecuación **(3)** :	$\mathbf{F = M \cdot a}$	(Donde a es la desaceleración del cuerpo en lo que alcanza el reposo)
Y de la ecuación **(2)** :	$\mathbf{a = (v_2 - v_1) / t}$	(En este caso, la velocidad final **(v_2)** del fluido es cero, entonces el cambio de velocidad **$-v$** es negativo, por lo tanto se trata de desaceleración)
Por lo anterior podemos escribir	$\mathbf{F = M \cdot v / t}$	(El cuerpo alcanza el reposo en un tiempo **t**)
Ahora de la ecuación **(6)** :	$\mathbf{E = F \cdot S}$	(El cuerpo alcanza el reposo en una distancia **S**)

Entonces la energía cinética $\mathbf{E_k}$ se expresa combinando las últimas dos ecuaciones:

$$\mathbf{E_k = M \cdot v \cdot S / t}$$

Hay que tomar en cuenta que la velocidad cambia de **v** a 0 en una distancia **S**, por lo que el valor promedio de la velocidad será tomado para calcular la energía en general. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{v_{av} = (v - 0) / 2 = v / 2}$$

Por lo anterior, la ecuación se reescribirá así: $\mathbf{E_k = M \cdot v / 2 \cdot S / t}$

Ahora tomando la ecuación **(1)** : $\mathbf{v = S / t}$

Podemos escribir la ecuación de la energía así: $\mathbf{E_k = ½ \cdot M \cdot v^2}$

Ahora calculamos la masa utilizando la ecuación **(5):**

$$\mathbf{M = \rho \cdot V}$$

En este caso, el volumen de un cilindro se obtiene con:

$$\mathbf{V = A \cdot S}$$

Entonces la masa se puede expresar como: $\mathbf{M = \rho \cdot A \cdot S}$

Esto lo substituimos en la ecuación de la energía cinética para que nos dé:

$$\mathbf{E_k = ½ \cdot \rho \cdot A \cdot S \cdot v^2} \qquad \textbf{(23)}$$

En el teorema de Bernoulli las energías se representan como presiones. De la ecuación **(4)** obtenemos:

$$\mathbf{P = F / A}$$

Y de la ecuación **(6)**: $\mathbf{E = F \cdot S}$

Combinando estas dos ecuaciones nos da: $\mathbf{P = E / (A \cdot S)}$

Entonces si dividimos la ecuación de la energía cinética **(23)** entre **(A . S)** nos queda en términos de presión:

$$\mathbf{P = ½ \cdot \rho \cdot A \cdot S \cdot v^2 / (A \cdot S)}$$

Los términos A.S (área por distancia) se eliminan para que nos quede la energía cinética en términos de una presión **(P_k)**:

$$\mathbf{P_k = ½ \cdot \rho \cdot v^2} \qquad \textbf{(24)}$$

Esta pinche ecuación representa pues la energía cinética de un fluido en términos de una presión. ¿Cómo ves?

Energía Potencial de un fluido

Consideremos una columna de fluido de una altura **h** y un área **A**, como se muestra en la Figura 11.

Para elevar esta columna de agua a una altura total **h** significa que estamos haciendo un trabajo en contra de la fuerza de gravedad. La fuerza requerida para hacer esto se expresa en la ecuación III, excepto que reemplazamos el término "**a**" por la aceleración de la gravedad "**g**":

$$\mathbf{F = M.g}$$

La masa de la columna se expresa en la ecuación **(5):**

$$\mathbf{M = r\ .A\ .\ h}$$

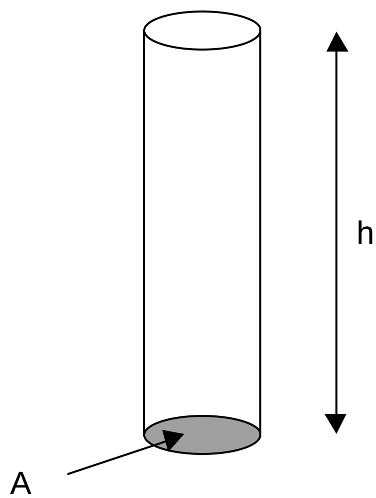

Figura 11

Ahora despejamos la ecuación para encontrar la fuerza requerida para elevar esta columna de fluido en contra de la fuerza de gravedad:

$$\mathbf{F = r\ .\ A\ .\ h\ .\ g}$$

Ahora tomando la ecuación **(6)**, la cantidad de energía requerida para llevar a cabo la acción es:

$$\mathbf{E = F\ .\ S}$$

En este caso no todo el fluido esta siendo levantado a una altura h, sino la altura promedio que se desplaza el fluido es h/2, por lo que podemos escribirlo como:

(25) $$E_p = r \,.\, A \,.\, h \,.\, g \,.\, S$$ en donde $$S = h / 2$$

Esta es la energía potencial **(E_p)** de la columna.

En el teorema de Bernoulli las energías se representan como presiones. Tomando en cuenta la ecuación **(4)** obtenemos lo siguiente:

$$P = F / A$$

Y de la ecuación (6): $$E = F \,.\, S$$

Combinando ambas ecuaciones obtenemos: $$P = E / (A \,.\, S)$$

Entonces si dividimos la ecuación de la energía potencial **(25)** entre **(A . S)** nos queda en términos de presión:

(26) $$P_p = r \,.\, g \,.\, h$$

Esta ecuación representa la energía potencial en términos de presión.

Pérdidas por fricción y el número de Reynolds

La pérdida de energía por fricción para fluidos que fluyen en una tubería se calcula con la siguiente ecuación:

(27) $$f_h = f \,.\, L \,.\, v^2 / 2 \,.\, D \,.\, g$$

donde **f** es el factor de fricción (ver cálculos)
L es la longitud de la tubería (m)
v es la velocidad promedio del fluido (m/s)
D es el diámetro de la tubería (m)
g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s/s)

La única variable que no tenemos en éste momento es el factor de fricción **(f)**. Este depende del tipo de fluido que circula en la tubería. Existen básicamente dos tipos de fluido (aunque hay un estado de transición entre éstos), éstos son:

a) **Flujo laminar**. Ejemplo: este es similar al humo de un cigarro en el aire quieto. Cerca del cigarro el flujo del humo es muy uniforme y fluye parejito, este es flujo laminar.
b) **Flujo turbulento**. Ejemplo: Esto se da cuando un flujo de humo de cigarro se vuelve inestable con remolinos. Este estado se encuentra en el flujo después del flujo laminar.

Estos dos estados de flujo pueden ser descritos por una cantidad sin dimensiones (solo un número) conocida como el número de Reynolds (N_{RE}). Este número se calcula con la siguiente fórmula:

(28) $$N_{RE} = v \,.\, D / m_k$$

donde **v** es la velocidad promedio del fluido (m/s)
D es el diámetro de la tubería (m)
m_k es la viscosidad cinemática del fluido (m^2/s) que es una medida de que tan “grueso” es el fluido.

Si el número de Reynolds es **menor de 2000** entonces el fluido es **laminar**. En este caso del factor de fricción (f) puede ser calculado con la siguiente ecuación:

(29) $$f = 64 / N_{RE}$$

Si el número del tal Reynolds es **mayor que 2000** entonces el fluido es **turbulento**. En este caso el factor de fricción **(f)** puede ser calculando una **tabla variable**.

Parámetros de diseño para un sistema de agua

La siguiente es una lista de parámetros de diseño que son importantes en el diseño de sistemas de agua por gravedad:

Límite de presión máximo.

En el momento que las llaves y las válvulas están cerradas se da la situación de mayor presión para el sistema. ¡Aguas aquí! El límite máximo de presión que aguanta la tubería es el que se utiliza para hacer los cálculos. Esta situación se toma en cuenta desde el principio del diseño para saber si se necesitarán tanques rompe presión y localizarlos.

Margen de seguridad:

Es el flujo mínimo de la fuente de agua. Es importante no tomar más de esta cantidad en ningún punto del sistema. Si esto sucede entonces los tanques de captación y los tanques rompepresión se van a vaciar más rápido de lo que llega agua del manantial entonces entra aire al sistema y se pone fea la cosa.

Presión baja o negativa

Si la presión (**P** en el Teorema de Bernoulli) se vuelve negativo en cualquier punto del sistema, suceden dos cosas:
Se produce un efecto de sifón en donde el agua se succiona de más abajo, lo que no es conveniente pues las uniones pueden chupar agua contaminada dentro del sistema.
Una presión negativa grande puede causar que el aire disuelto en el agua salga de éste y cree bloqueos de aire **Jordán o sea la biblia p. 53** sugiere que la presión no debe ser menor a 10 m (98100 Pa) en cualquier parte del sistema y nunca debe llegar a ser negativa.

Límites de velocidad

La velocidad del flujo en las tuberías no debe ser muy alta debido a que las partículas suspendidas pueden causar excesivo desgaste. Por otra parte, si la velocidad es muy baja, entonces las partículas se sedimentarán y pueden llegar a taparse las tuberías, por lo que será necesario instalar válvulas de lavado en los puntos más bajos del sistema. **La biblia [P.53]** en el apocalipsis, sugiere que la velocidad mínima debe ser de 0.7m/s y la máxima de 3.0m/s.

Flujo natural

El flujo natural (ver sección 8 i) puede permitirse en ciertas secciones del sistema, pero hay que tener cuidado porque puede también causar problemas ya que la velocidad del agua puede superar los límites establecidos y puede aumentar el flujo arriba del margen de seguridad y ya valió otra vez. Es importante echarle un ojo a estos bisnes.

Presión residual

La presión residual en una toma o válvula es importante, si es muy alta causará el desgaste de la válvula y la va a chingar y si es muy baja el flujo será muy poco y te van a decir cosas raras en tseltal. **La biblia [P.141 según san roger]** sugiere los siguientes parámetros:

Mínimo absoluto	7m
Ideal bajo	10m
Ideal	15m
Ideal alto	30m
Máximo absoluto	56m

Bloqueos de aire

Estos ocurren cuando hay pequeñas elevaciones en el terreno mas abajo del nivel del tanque de almacenamiento en donde puede quedar atrapado el condenado aire, absorbiendo energía lo que causará que se detenga el pinche flujo. **La Biblia [P.55]** sugiere las siguientes técnicas para evitar los bloqueos de aire:

1. Diseñar un diámetro de tubería en el que la pérdida por fricción entre el manantial y el primer tapón de aire sea la mínima.
2. En las elevaciones donde pueda haber un tapón de aire hay que usar un diámetro de tubería mayor antes del punto más alto y un diámetro menor después de éste punto.
3. Los tapones de aire que estén situados más alto son los más problemáticos y deben ser eliminados o minimizados primero.
4. Colocar válvulas expulsoras de aire en donde sea necesario.

Costo

Cuando sea posible hay que usar diámetros pequeños de tubería pues son más baratos. A menudo es más barato combinar diámetros diferentes que utilizar un solo tamaño, en caso de que se esté usando poliducto se pueden redondear las distancias a los 100 m. Hay que minimizar el número de estructuras de concreto como tanques rompepresión para que no se te eleve mucho el precio y quede pa cotorrear.

Ejemplos Resueltos

Flujo natural

Teorema de Bernoulli

Si P1 = P2 (Presión atmosférica)
V1 = 0 (el agua está en reposo)

Eliminamos y nos queda

Si dividimos ambos lados de la ecuación entre para que cambie de términos de presión a términos de presión en altura.

Así podemos calcular el flujo natural. Para facilitarnos el cálculo despejamos la fórmula

Pasos para calcular V2

Escoger un valor para V2 y calcular la fh de la ecuación n
Dividir este valor entre (L/100) para obtener un valor de fh de la tabla de fricción
Buscar en la tabla el valor equivalente de V2
Repetir el punto 1 con este nuevo valor de V2 sucesivamente hasta que V2 no cambie mucho
El flujo (Q) se obtiene de la ecuación de la continuidad

Así hemos calculado el flujo natural para el sistema
Ejemplo

Flujo natural con tuberías de diferentes diámetros y longitudes

Sistema de tomas sencillo (llaves abiertas)

Sistema de tomas sencillo (llaves cerradas)

Bombeo

Sistemas de distribución: La ecuación general

Tuberías paralelas

Fuentes de agua a diferentes alturas

Diseño de un sistema hidráulico