



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO

Hugo Estuardo Gálvez Villanueva

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, noviembre 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE
CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

HUGO ESTUARDO GÁLVEZ VILLANUEVA

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Félix Rosendo Miranda
EXAMINADOR	Ing. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha veintidós de abril de 2008.



Hugo Estuardo Gálvez Villanueva

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme sabiduría e inteligencia para cumplir mis metas y guiarme por el buen camino.
- Mis padres** Por apoyarme en toda mi vida.
- La Universidad** Por otorgarme todos los conocimientos necesarios para ser un buen profesional.

Guatemala, 7 de octubre de 2008

Ing. Pedro Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que se concluyó satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO**, desarrollado por el alumno Hugo Estuardo Gálvez Villanueva quien se identifica con número de carné 2005-11643, perteneciente a la carrera de Ingeniería Civil, el cual se implementará como una practica adicional en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.

Sin otro particular por el momento aprovecho la ocasión para saludarlo y suscribirme.

Atentamente,


Ingeniero Luis Sandoval
Colegiado 6496

LUIS M. SANDOVAL MENDOZA
INGENIERO CIVIL
Colegiado No 6496



Guatemala, 28 de octubre de 2008

Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero:

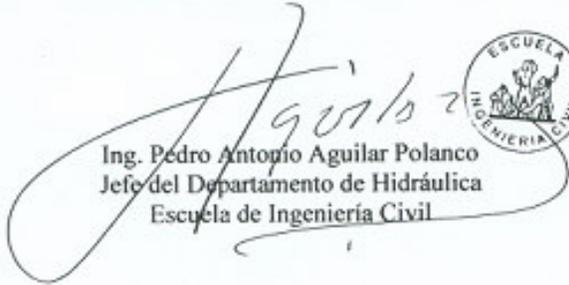
Atentamente y por este medio, envié a usted el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante HUGO ESTUARDO GÁLVEZ VILLANUEVA, con el título "ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO".

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la APROBACIÓN DEL MISMO, por parte del asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por APROBADO; solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

cc. Archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Hugo Estuardo Gálvez Villanueva, titulado ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Sydney Alexander Samuels Wilson



Guatemala, noviembre 2008.

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.414.2008

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE CARGA TOTAL EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD Y POR BOMBEO**, presentado por el estudiante universitario **Hugo Estuardo Gálvez Villanueva**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, noviembre de 2008



Indech

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
1.1 Conservación de la energía – ecuación de Bernoulli	1
1.2 Interpretación de la ecuación de Bernoulli	5
1.3 Restricciones de la ecuación de Bernoulli	7
1.4 Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli	7
1.5 Pérdidas mayores	11
1.6 Pérdidas menores	12
1.7 Ecuación general de la energía	16
1.8 Flujo laminar y turbulento	17
1.9 Número de Reynolds	18
1.10 Ecuación de Darcy	19
1.11 Pérdida por fricción en flujo laminar	20
1.12 Pérdida por fricción en flujo turbulento	21
1.13 Ecuación de Hazen-Williams	26
1.14 Línea de carga total y carga piezométrica	28
2 ENSAYO DE LABORATORIO	
2.1 Descripción del equipo de prueba	31
2.2 Ensayo por gravedad	35
2.2.1 Objetivos	35

2.2.2 Descripción del ensayo	35
2.2.3 Cálculos	36
2.3 Ensayo por bombeo	48
2.3.1 Objetivos	48
2.3.2 Descripción del ensayo	48
2.3.3 Cálculos	49
2.4 Ensayo de pérdida por fricción en tubería por gravedad	61
2.4.1 Objetivos	61
2.4.2 Descripción del ensayo	61
2.4.3 Cálculos	62
2.5 Ensayo de pérdida por fricción en tubería por bombeo	73
2.4.1 Objetivos	73
2.4.2 Descripción del ensayo	73
2.4.3 Cálculos	74
2.6 Análisis de resultados	84
3 INSTRUCTIVO DE ENSAYO	87
3.1 Instructivo de pérdidas localizadas	87
3.2 Instructivo de pérdidas por fricción	89
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Elemento de un fluido en una tubería.	1
2. Energía de flujo	3
3. Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli.	3
4. Carga de presión, carga de elevación, carga de velocidad y carga total.	6
5. Superficie de tanque expuesto a la atmosfera	8
6. Bomba	9
7. Turbinas	10
8. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de la energía.	16
9. Flujo laminar y turbulento	18
10. Diagrama de Mody.	22
11. Línea piezométrica	29
12. Línea de carga	29
13. Perfil del sistema	33
14. Vista lateral	33
15. Sistema general	34
16. Circuito de sistema	34
17. Sistema por gravedad	35
18. Gráfica de carga piezométrica	41
19. Gráfica de carga total	43
20. Sistema por bombeo	48
21. Gráfica de carga piezométrica	54
22. Gráfica de carga total	56
23. Esquema de tubería de PVC	61

24. Tubería PVC	62
25. Gráfica de carga piezométrica	67
26. Gráfica de carga total	69
27. Esquema de tubería PVC	73
28. Gráfica de carga piezométrica	79
29. Gráfica de carga total	81
30. Válvula de definición de sistema	87
31. Válvula de definición de sistema	89

TABLAS

I	Pérdidas menores	14
II	Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada en longitud equivalente	15
III	Coeficiente de Hazen-Williams	28
IV	Tiempos obtenidos	36
V	Carga piezométrica	37
VI	Pérdida de energía	38
VII	Determinación de k por tramo	41
VIII	Determinación de carga total por tramo	43
IX	Cuantificación de accesorios por tramos	45
X	Pérdidas de cada accesorio	46
XI	Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas	47
XII	Tiempos obtenidos	49
XIII	Carga piezométrica	50
XIV	Pérdida de energía	51
XV	Determinación de k por tramo	53

XVI	Determinación de carga total por tramo	55
XVII	Cuantificación de accesorios por tramos	57
XVIII	Pérdidas teoricas de cada accesorio	59
XIX	Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas	60
XX	Tiempos obtenidos	62
XXI	Carga piezométrica	64
XXII	Pérdida de energía	65
XXIII	Determinación de k por tramo	67
XXIV	Determinación de carga total por tramo	69
XXV	Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas	71
XXVI	Tiempos obtenidos	74
XXVII	Carga piezométrica	75
XXVIII	Pérdida de energía	76
XXIX	Determinación de k por tramo	78
XXX	Determinación de carga total por tramo	80
XXXI	Tabla de comparación teórica y práctica	83

GLOSARIO

Fluido	Cuerpo cuyas moléculas cambian con facilidad respecto a su posición relativa.
Energía	Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento.
Fuerza	Acción entre dos cuerpos que cambian o tienden a cambiar cualquier relación física entre ambos.
Potencia	Trabajo producido por unidad de tiempo.
Densidad	Es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia.
Peso específico	Es el peso por unidad de volumen de una sustancia.
Trabajo	Es el producto de las magnitudes del desplazamiento y de la componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento.
Presión	Es la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área de una sustancia o sobre una superficie.

Viscosidad	La viscosidad es una propiedad de los fluidos que causa fricción. Además, la viscosidad es una medida de la resistencia del fluido al corte cuando el fluido está en movimiento.
Línea carga total	Es la línea la cual se refiere al lugar geométrico de los puntos representativos de las tres cargas: de velocidad, de presión y de posición.
Línea carga piezométrica	Es la línea representada por las alturas representadas por los tubos piezométricos y representan la carga de presión.
Número de Reynolds	Es un parámetro que toma en cuenta la velocidad entre el fluido que circula y el material que lo envuelve, una dimensión lineal típica y la viscosidad cinemática del fluido
Bomba	Máquina para elevar, trasegar o comprimir fluidos.
Turbina	Máquina rotativa que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas.
Tubería	Tubo empleado para transportar de un punto a otro líquidos, sólidos fragmentados o mezclas de líquidos y sólidos.
Caudal	Cantidad de agua que mana o corre por unidad de tiempo.

Corrosión

Proceso paulatino que cambia la composición química de un cuerpo metálico por acción de un agente externo, destruyéndolo manteniendo lo esencial en su forma.

Válvula

Accesorio que sirve para interrumpir alternativa o permanentemente la comunicación de fluidos, controlan la dirección, la presión, el volumen o combinación de estas magnitudes.

RESUMEN

La elaboración del presente trabajo consta de tres capítulos, los cuales fundamentan teoría para el entendimiento correcto de los análisis y de los términos utilizados.

El capítulo uno hace referencia a los temas y conceptos fundamentales de la mecánica de fluidos, incluyendo la ecuación general de la energía, los tipos de pérdida de energía que existen, los tipos de flujo y la definición de la línea de carga total y la línea de carga piezométrica. También se considera el uso de la ecuación de Darcy en flujos turbulentos como laminares así como la ecuación de Hazen-Williams.

El capítulo dos trata del análisis de laboratorio del sistema de conducción, ensayándolo en dos casos, por gravedad y por bombeo, determinando los factores más importantes para la realización de la línea de carga total y línea de carga piezométrica, así como el cálculo de las diferentes constantes de pérdida en cada tramo y la comparación teórica y práctica de la pérdida de energía.

El capítulo tres se fundamenta en un instructivo de ensayo de laboratorio del sistema, para llevar a cabo los diferentes análisis de energía en un sistema de conducción, mostrando los principales pasos y guías para tener una mejor comprensión del mismo.

OBJETIVOS

General:

Diseñar un pequeño sistema hidráulico, que represente un sistema de abastecimiento el cual pueda trabajar como sistema por gravedad o como sistema por bombeo, incluyendo la mayor parte de accesorios y tuberías comerciales de P.V.C, para conocer la línea de carga total de cada sistema, basado en la implementación manual de tubos piezométricos.

Específicos:

1. Elaborar un tablero horizontal, basado en un circuito hidráulico que pueda funcionar como sistema de conducción por bombeo y por gravedad, formado por tuberías y accesorios de P.V.C, así como el diseño de tubos piezométricos sencillos.
2. Conocer las diferentes clases de pérdida de energía que se dan en un sistema de conducción y que parámetros depende cada una de estas.
3. Determinar el comportamiento de la línea de carga piezométrica y la línea de carga total en un sistema de conducción por bombeo y por gravedad.
4. Determinar los diferentes factores de pérdida de energía de cada tramo en base a la cantidad lineal de tubería que se tenga y los diferentes accesorios que existan en los mismos.
5. Hacer una comparación teórica y práctica de la pérdida de energía, ocasionada por los diferentes accesorios co base a los factores que demuestran las tablas de los libros de texto.

INTRODUCCIÓN

Conocer el comportamiento de la carga total de energía y la carga piezométrica en un sistema de conducción ya sea por gravedad o por bombeo es fundamental para prever futuros problemas de diseño y así mantener la seguridad de los mismos, como es el caso de proyectos de abastecimiento de agua potable, cuyos problemas más comunes que se dan son las sobrepresiones en las tuberías y el golpe de ariete.

El análisis de la línea de carga total y línea de carga piezométrica de un sistema de conducción, se basa en la definición y cuantificación de los componentes o accesorios que contenga, los cuales provocan diferentes pérdidas de energía, lo que produce variaciones de energía, influyendo directamente en las presiones de trabajo en las tuberías y los caudales de diseño.

El estudio del comportamiento y la variación de las presiones en el sistema diseñado, se basa en la lectura de los tubos piezométricos diseñados y ubicados estratégicamente con el objetivo de analizar las diferentes pérdidas de energía que ocurren en cada tramo del sistema, provocado por un conjunto de accesorios y por los diferentes metros lineales de tubería que se tengan para posteriormente determinar y definir un factor de pérdida por tramo y hacer una comparación teórica y práctica.

;

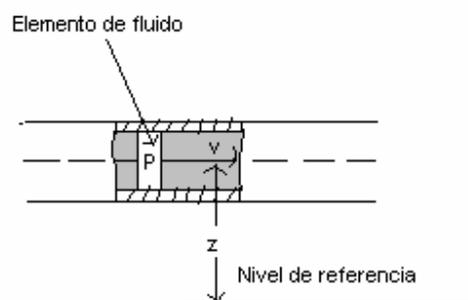
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Conservación de la energía, ecuación de Bernoulli

El término fluido engloba tanto a líquidos como a gases, ya que en ambos estados la materia puede moverse bajo la acción de la presión. Los principios que se aplican para sistemas de partículas también pueden aplicarse al movimiento de fluidos. El fluido es un sistema de partículas continuo.

La dinámica de los líquidos está regida por el mismo principio de la conservación de la energía, el cual fue aplicado a ellos por el físico suizo Daniel Bernoulli (1700–1782), obteniendo como resultado una ecuación muy útil en este estudio, que se conoce con su nombre.

Figura 1 **Elemento de un fluido en una tubería**



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 166.

Existen tres formas de energía que se toman siempre en consideración cuando se analiza un problema de flujo en tuberías. Se considera un elemento de fluido como el que se ilustra en la figura 1, dentro de una tubería en un sistema de flujo. Se localiza a cierta elevación z , tiene velocidad v y presión p . El elemento de fluido posee las formas de energía siguientes:

1. Energía potencial. Debido a su elevación, la energía potencial del elemento en relación con algún nivel de referencia es:

$$EP = wz \quad \text{Ec.1}$$

Donde w es el peso del elemento.

2. Energía cinética. Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es

$$EC = wv^2 / 2g \quad \text{Ec.2}$$

3. Energía de flujo. A veces llamada *energía de presión o trabajo de flujo*, y representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de cierta sección contra la presión p . La energía de flujo se abrevia EF y se calcula por medio de

$$EF = wp / \gamma \quad \text{Ec.3}$$

La ecuación Ec.3 se obtiene como sigue. La figura 1.2 muestra al elemento de fluido en la tubería mientras se mueve a través de una sección. La fuerza sobre el elemento es pA , donde p es la presión en la sección y A es el área de esta. Al mover el elemento a través de la sección, la fuerza recorre una distancia L igual a la longitud del elemento.

Por lo tanto, el trabajo que se realiza es

$$\text{Trabajo} = pAL = pV$$

donde V es el volumen del elemento. El peso del elemento w es

$$w = \gamma V$$

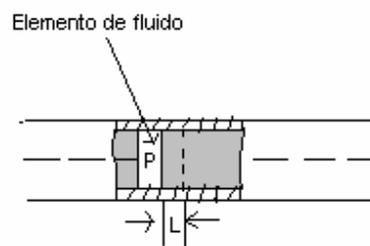
donde γ es el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es

$$V = w / \gamma$$

y se obtiene

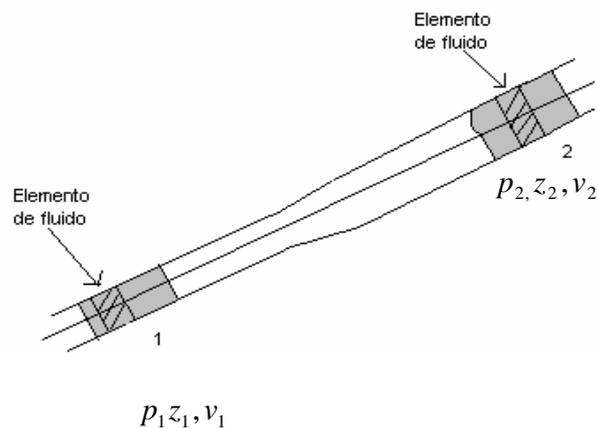
Trabajo = $pV = pw / \gamma$ denominada energía de flujo, y se representa con la ecuación Ec. 3.

Figura 2 **Energía de flujo**



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 166.

Figura 3 **Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli.**



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 167.

Entonces, la cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido es la suma E ,

$$E = EF + EP + EC$$
$$E = wp / \gamma + wz + wv^2 / 2g$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía como el Newton-metro (N-m) en el Sistema Internacional SI, y el pie-libra (pie-lb) en el Sistema Inglés.

Ahora, se considera el elemento de fluido en la figura 3, que se mueve de la sección 1 a la 2. Los valores de p , z y v son diferentes en las dos secciones. En la sección 1, la energía total es

$$E_1 = \frac{wp_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g}$$

En la sección 2, la energía total es

$$E_2 = \frac{wp_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g}$$

Si no hay energía que se agregue o pierda en el fluido entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que

$$E_1 = E_2$$
$$\frac{wp_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{wp_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g}$$

El peso del elemento w es común a todos los miembros y se elimina al dividir entre el.

Así, la ecuación se convierte en:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{E.c 4}$$

Conocida como la *ecuación de Bernoulli*.

1.2 Interpretación de la ecuación de Bernoulli

Cada término de la ecuación de Bernoulli, ecuación (Ec. 4), resulta de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido.

La unidad de cada término es energía por unidad de peso. En el sistema SI las unidades son N-m/N, y en el Sistema Inglés son lb-pie/lb.

Sin embargo, se observa que la unidad de fuerza aparece tanto en el numerador como en el denominador, y por ello puede cancelarse. La unidad resultante es tan solo el metro (m) o el pie, y se interpreta como una altura. En el análisis del flujo de fluidos los términos se expresan por lo común como altura, en alusión a una altura sobre un nivel de referencia. En específico,

p/γ es la carga de presión

z es la carga de elevación

$v^2/2g$ es la carga de velocidad

A la suma de estos tres términos se le denomina carga total.

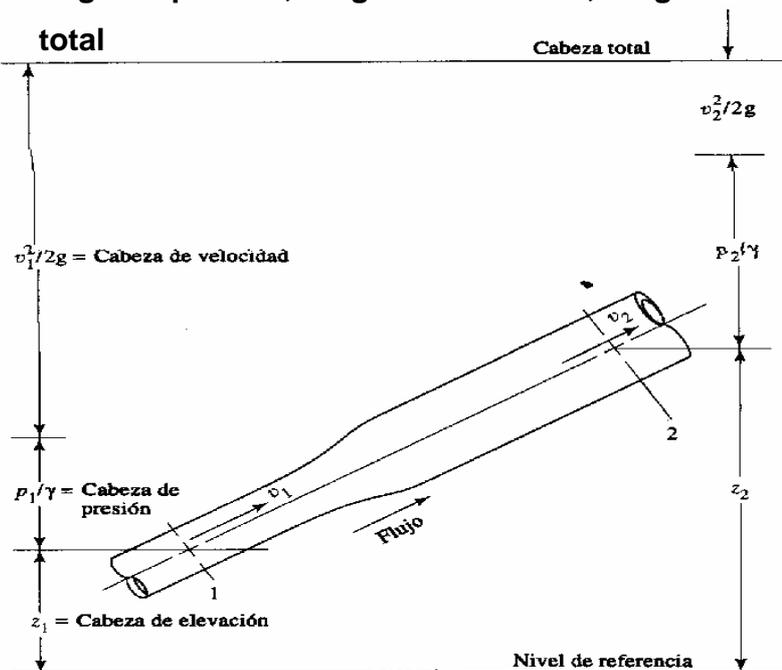
Debido a que cada término de la ecuación de Bernoulli representa una altura, un diagrama similar al que se muestra en la figura 4 ayuda a visualizar la relación entre los tres tipos de energía. Conforme el fluido se mueve del punto 1 al 2, la magnitud de cada término puede cambiar su valor.

Sin embargo, si el fluido no pierde o gana energía, la carga total permanece a un nivel constante. La ecuación de Bernoulli se utiliza para determinar los valores de carga de presión, carga de elevación y cambio de la carga de velocidad, conforme el fluido circula a través del sistema.

En la figura 4 se observa que la carga de velocidad en la sección 2 será menor que en la sección 1. Esto se demuestra por medio de la ecuación de continuidad,

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Figura 4 Carga de presión, carga de elevación, carga de velocidad y carga



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 168.

Debido a que $A_1 < A_2$, v_2 debe ser menor que v_1 . Y como la velocidad está elevada al cuadrado en el término de la carga de velocidad, $v_2^2/2g$ es mucho menor que $v_1^2/2g$.

Es común que cuando crece el tamaño de la sección, como ocurre en la figura 4, la carga de presión se incrementa porque la carga de velocidad disminuye. Este es el modo en que se construyó la figura 4. Sin embargo, el cambio real también se ve afectado por el cambio en la carga de elevación.

1.3 Restricciones de la ecuación de Bernoulli

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a bastantes problemas prácticos, hay limitaciones que se deben conocer, a fin de aplicarla con propiedad.

1. Es válida sólo para fluidos incompresibles, porque se supone que el peso específico del fluido es el mismo en las dos secciones de interés.
2. No puede haber dispositivos mecánicos que agreguen o retiren energía del sistema entre las dos secciones de interés, debido a que la ecuación establece que la energía en el fluido es constante.
3. No puede haber transferencia de calor hacia el fluido o fuera de éste.
4. No puede haber pérdida de energía debido a la fricción.

1.4 Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli

Procedimiento para aplicar la ecuación de Bernoulli

1. Decidir cuáles son los términos conocidos y cuáles deben calcularse.
2. Determinar cuáles son las dos secciones del sistema que se usarán para aplicar la ecuación de Bernoulli. Una de ellas se elige porque se concentran varios datos conocidos. En la otra, por lo general, algo habrá que calcular.

3. Es importante que la ecuación de Bernoulli se escriba en la dirección del flujo.
4. Es necesario ser explícito en la denominación de los subíndices de los términos de la carga de presión, carga de elevación y carga de velocidad de la ecuación de Bernoulli.
5. Simplificar la ecuación, si es posible, con la cancelación de los términos que valgan cero o de los que aparezcan como iguales en ambos lados de la ecuación.

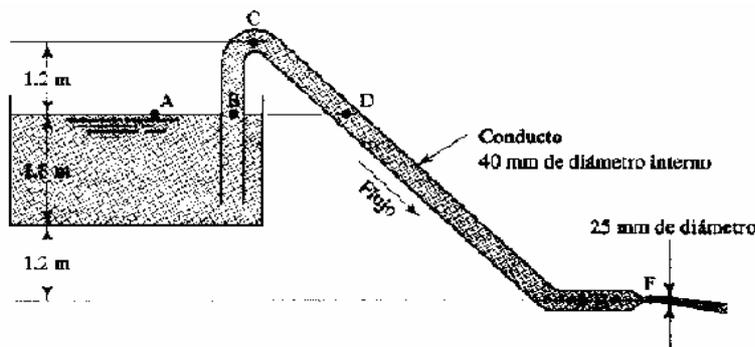
Simplificaciones:

Cuando el fluido en un punto de referencia está expuesto a la atmósfera, la presión es igual a cero y el término de la carga de presión se cancela en la ecuación de Bernoulli.

A la carga de velocidad en la superficie de un tanque o depósito se le considera igual a cero, y se cancela en la ecuación de Bernoulli.

Cuando los dos puntos de referencia en la ecuación de Bernoulli están dentro de una tubería del mismo tamaño, los términos de carga de velocidad en ambos lados de la ecuación sean iguales y se cancelan.

Figura 5. **Superficie de tanque expuesta a la atmósfera.**



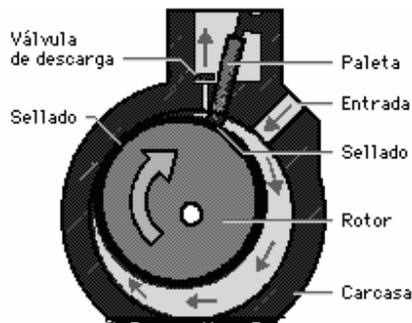
Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 172.

En un sistema de conducción existen distintos dispositivos y componentes que agregan energía al fluido, la retiran de éste, o provocan pérdidas indeseables de ella.

Se mencionarán dichos dispositivos en términos conceptuales, como es el caso de las bombas, los motores de fluido y la pérdida por fricción conforme el fluido pasa por ductos y tubos, pérdidas de energía por cambios en el tamaño de la trayectoria de flujo, y pérdidas de energía por las válvulas y accesorios.

Una bomba es un ejemplo común de dispositivo mecánico que añade energía a un fluido. Un motor eléctrico o algún otro aditamento impulsa un eje rotatorio en la bomba, ésta aprovecha la energía cinética y la transmite al fluido, lo que provoca el movimiento de éste y el incremento de su presión.

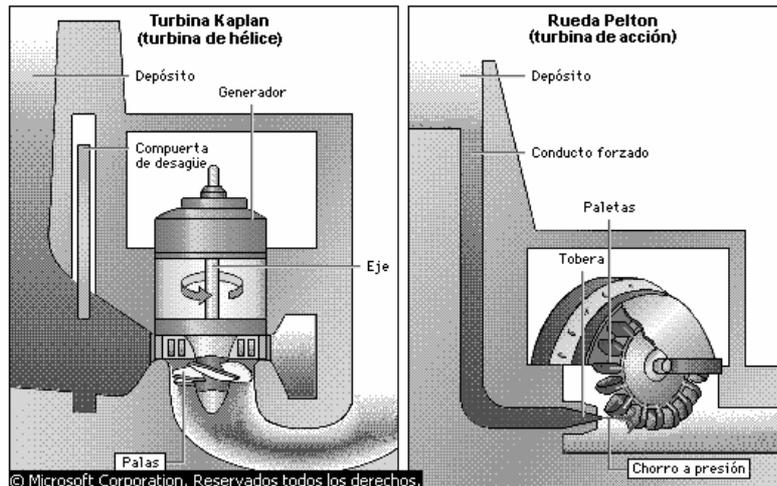
Figura 6. **Bomba**



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 192.

Los motores de fluido, turbinas, actuadores rotatorios y lineales, son algunos ejemplos de dispositivos que toman energía de un fluido y la convierten a una forma de trabajo, por medio de la rotación de un eje o el movimiento de un pistón.

Figura 7. Turbinas



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos, pág. 192.

Un fluido en movimiento presenta resistencia por fricción al fluir. Parte de la energía del sistema se convierte en energía térmica (calor), que se disipa a través de las paredes de la tubería, por la que circula el fluido. La magnitud de la energía que se pierde depende de las propiedades del fluido, velocidad de flujo, tamaño de la tubería, acabado de la pared de la tubería y la longitud de la misma.

Cuando un fluido circula por una tubería, sufre pérdidas en su energía por diferentes causas; siendo las más comunes las pérdidas por:

1. Fricción
2. Entrada
3. Salida
4. Súbito ensanchamiento de la tubería
5. Súbita contracción de la tubería
6. Accesorios (válvulas, codos, tee, etc).

Las pérdidas y ganancias de energía en un sistema se contabilizan en términos de energía por unidad de peso del fluido que circula por él. Esto también se le conoce como carga. Como abreviación de la carga se empleara el símbolo h , para las pérdidas y ganancias de energía. Los términos más comunes son los siguientes:

h_A Energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico, como una bomba; es frecuente que se le denomine carga total sobre la bomba.

h_R Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico, como un motor de fluido o turbina.

h_L Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías, o pérdidas menores por válvulas y otros accesorios.

1.5 Pérdidas mayores

Cuando la tubería es de gran longitud, las pérdidas por fricción llegan a ser tan grandes que a veces pueden desprejarse las demás pérdidas por ser muy pequeñas comparadas con ella. Las pérdidas por fricción dependen de:

1. El material de que está construido el tubo (hierro, PVC, concreto, cobre, galvanizado..)
2. El estado de la tubería (nueva, vieja, con incrustaciones,.. etc.)
3. La longitud de la tubería
4. El diámetro de la tubería
5. Velocidad de circulación del fluido en la tubería.

De acuerdo con lo anterior, en las leyes que rigen las pérdidas de carga por fricción en tuberías intervienen a nivel general los siguientes factores:

1. Es proporcional a la longitud de la tubería
2. Es inversamente proporcional al diámetro de la tubería
3. Es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de circulación del fluido.

1.6 Pérdidas menores

Es común que los elementos que controlan la dirección o el flujo volumétrico del fluido en un sistema generen turbulencia local en éste, lo que ocasiona que la energía se disipe como calor. Siempre que hay una restricción: por ejemplo, un cambio en la velocidad o dirección del flujo, hay pérdidas de este tipo. En un sistema grande la magnitud de las pérdidas por las válvulas y accesorios, por lo general es pequeña en comparación con las pérdidas por fricción en las tuberías. Por lo tanto, las mismas reciben el nombre de pérdidas menores.

En la parte de orificios que al salir de un tanque de almacenamiento, los diferenciales de líquidos cambian de dirección al entrar al tubo, originándose una pérdida de energía.

Esta pérdida de carga que es proporcional al cuadrado de la velocidad, será tanto menor cuanto menos dificultad tengan los diferenciales al entrar al tubo, lo cual dependerá del grado de abocinamiento de la entrada.

Casos similares suceden al pasar el agua de la tubería a un almacenamiento, en los cambios de dirección, en los ensanchamientos y contracciones súbitas tanto bruscas como graduales.

Estas pérdidas menores están dadas en general, por fórmulas que dependen de las cargas de velocidad y cuyas expresiones generales son del tipo $KV^2/2g$ o, $K(V^2_1 - V^2_2)/2g$, cuyos coeficientes K son típicos para cada caso particular y para lo cual se han construido tablas de acuerdo con experiencias de laboratorio.

Tabla I. Pérdidas menores

ACCESORIOS	PÉRDIDAS DE CARGA MEDIA
1- De depósito a tubería. Pérdida de entrada.	
- Conexión a ras de la pared	$0,50 \frac{V_2^2}{2g}$
- Tubería entrante	$1,00 \frac{V_2^2}{2g}$
- Conexión abocinada	$0,50 \frac{V_2^2}{2g}$
2 - De tubería a depósito. Pérdida a la salida.	$1,00 \frac{V_1^2}{2g}$
3 - Ensanchamiento brusco	$\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$
4 – Ensanchamiento gradual	$K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$
5 – Venturímetros, boquillas y orificios	$\left(\frac{1}{C_v^2} - 1\right) \frac{V_2^2}{2g}$
6 – Contracción brusca	$K_c \frac{V_2^2}{2g}$
7 – Codos, accesorios, válvulas	
Algunos valores corrientes de K son:	
- 45°, codo0,35 a 0,45	
- 90°, codo0,50 a 0,75	
- Tes1,50 a 2,00	
- Válvulas de compuerta (abierta)...0,25	
- Válvulas de control (abierta)...3,0	
	$K \frac{V^2}{2g}$

Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos Aplicada, pág. 297

La resistencia que se producen en válvulas y accesorios se puede expresar como longitud equivalente en diámetros de conducto, L/D.

Tabla II. Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada en longitud equivalente

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto, L/D
Válvula de globo-completamente abierta	340
Válvula de ángulo- completamente abierta	150
Válvula de compuerta- completamente abierta	8
-3/4 abierta	35
-1/2 abierta	160
-1/4 abierta	900
Válvula de verificación- tipo giratorio	100
Válvula de verificación-tipo de bola	150
Válvula de mariposa- completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio de largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Te estándar- con flujo a través de un tramo	20
Te estándar – con flujo a través de una rama	60

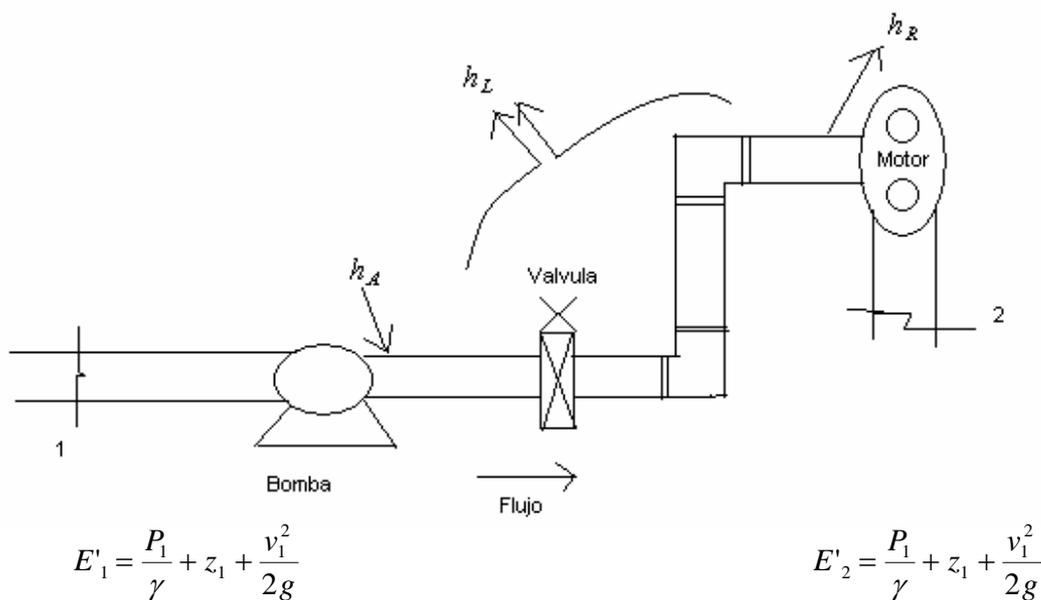
Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos Aplicada, pág. 297

1.7 Ecuación general de la energía

En esta parte se analizará la ecuación general de la energía como extensión de la ecuación de Bernoulli. En la figura 8 se aprecia la interpretación lógica de la ecuación de la energía, la cual representa un sistema de flujo. Los términos E'_1 y E'_2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2, respectivamente. Se muestran las energías agregadas, removidas y pérdidas h_A , h_R y h_L . Para un sistema tal, la expresión del principio de conservación de la energía es

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2$$

Figura 8. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de la energía



Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos Aplicada, pág. 203

La energía que posee el fluido por unidad de peso es:

$$E = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 5}$$

Entonces, la ecuación (1-5) se convierte en:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 6}$$

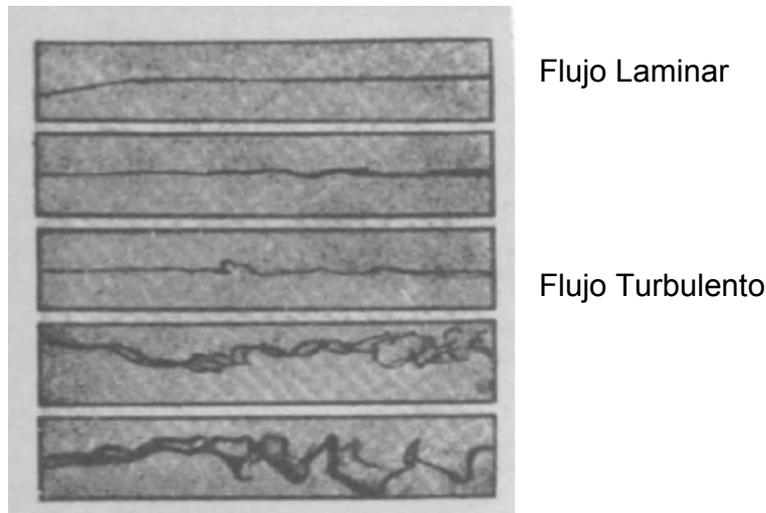
Esta es la forma de la ecuación de la energía que se empleará con mayor frecuencia. Igual que la ecuación de Bernoulli, cada término de la ecuación representa una cantidad de energía por unidad de peso de fluido que circula por el sistema.

1.8 Flujo laminar y turbulento

Cuando el agua sale de un grifo a velocidad muy baja, el flujo parece suave y estable. La corriente tiene un diámetro casi uniforme y hay poca o ninguna evidencia de que sus distintas partes se mezclan. A éste se le denomina flujo laminar, término derivado de la palabra lámina, debido a que el fluido parece moverse en láminas continuas con poca o ninguna mezcla de una capa con las adyacentes.

Cuando el grifo está abierto casi por completo, el agua tiene una velocidad mayor. Los elementos del fluido parecen mezclarse en forma caótica dentro de la corriente. Esta es la descripción general de un flujo turbulento.

Figura 9. Flujo laminar o turbulento



Fuente: J. M. de Azevedo y Guillermo Acosta A. Manual de Hidráulica, pág. 104.

1.9 Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento.

Por esta razón, se necesita un medio para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo en realidad. Se demuestra en forma experimental y se verifica de modo analítico, que el carácter del flujo en un tubo redondo depende de cuatro variables: la densidad del fluido ρ , su viscosidad η , el diámetro del tubo D y la velocidad promedio del flujo v .

Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que es posible pronosticar el flujo laminar o turbulento si se conoce la magnitud de un número adimensional, al que hoy se le denomina número de Reynolds (N_R).

La ecuación siguiente muestra la definición básica del número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \quad \text{Ec. 7}$$

Los flujos tienen números de Reynolds grandes debido a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja, y tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos con viscosidad alta y/o que se mueven a velocidades bajas, tendrán números de Reynolds bajos y tenderán a comportarse en forma laminar.

Para aplicaciones prácticas del flujo en tuberías, se encuentra que si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, éste será laminar. Si el número es mayor que 4000, el flujo será turbulento. En el rango de número de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir que flujo existe; por lo tanto, se le denomina región crítica.

1.10 Ecuación de Darcy

En la ecuación general de la energía

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

en términos de h_L se le definió como la pérdida de energía en el sistema. Una componente de la pérdida de energía es la fricción en el fluido que circula. Para el caso del flujo en tuberías y tubos, la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud al diámetro de la corriente. Esto se expresa en forma matemática como la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 8}$$

donde:

h_L = pérdida de energía debido a la fricción

L = longitud de la corriente del flujo (m o pies)

D = diámetro de la tubería (m o pies)

v = velocidad promedio del flujo (m/s o pies/s)

f = factor de fricción (adimensional)

La ecuación de Darcy se utiliza para calcular la pérdida de energía debido a la fricción en secciones rectilíneas y largas de tubos redondos, tanto para flujo laminar como turbulento.

1.11 Pérdida por fricción en flujo laminar

Cuando existe flujo laminar el fluido parece moverse como si fueran varias capas, una sobre la otra. Debido a la viscosidad del fluido, se crea un esfuerzo cortante entre sus capas. Se pierde energía del fluido por la acción de las fuerzas de fricción que hay que vencer, y que son producidas por el esfuerzo cortante. Debido a que el flujo laminar es tan regular y ordenado, es posible obtener una relación entre la pérdida de energía y los parámetros mensurables del sistema de flujo.

$$h_L = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} \quad \text{Ec. 8}$$

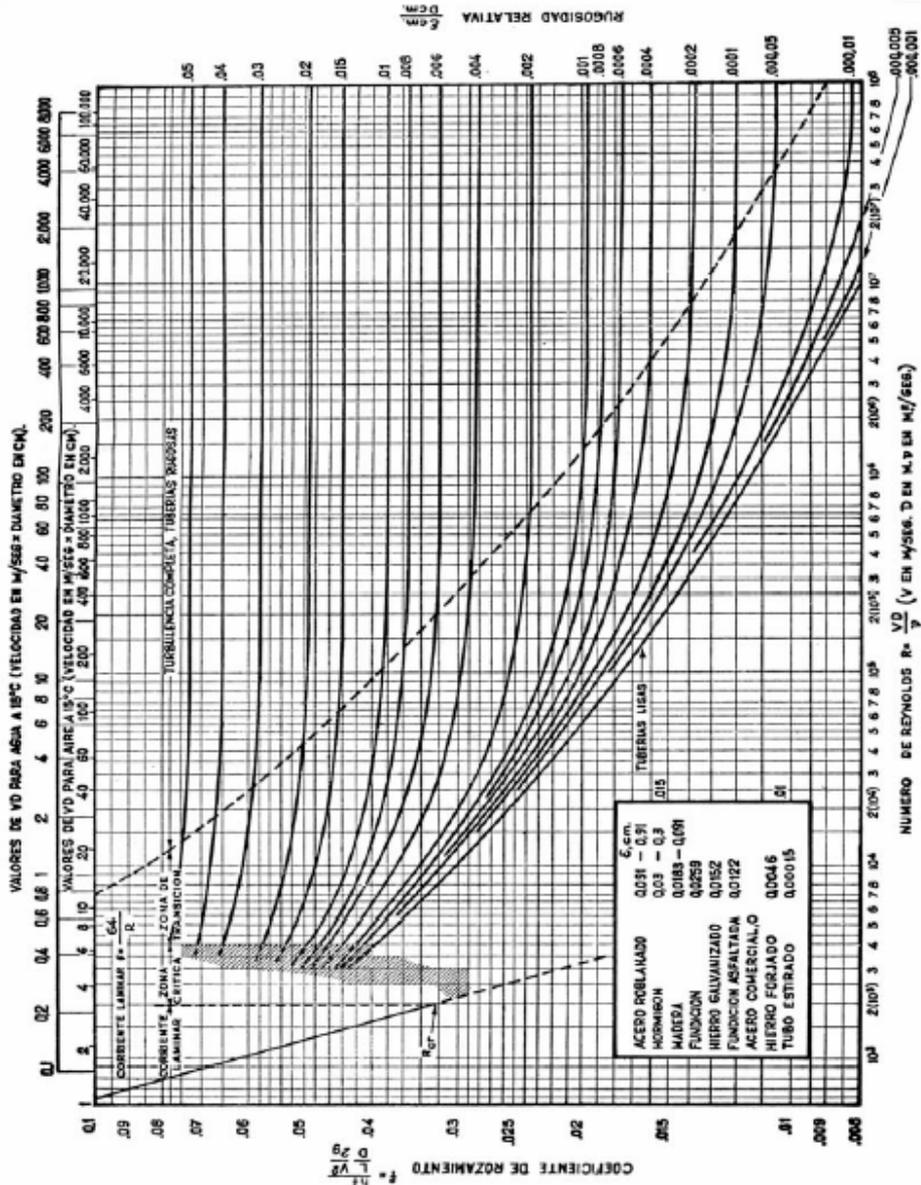
1.12 Pérdida por fricción en flujo turbulento

Cuando hay flujo turbulento en tuberías es más conveniente usar la ecuación de Darcy para calcular la pérdida de energía debido a la fricción. El flujo turbulento es caótico y varía en forma constante. Por estas razones, para determinar el valor de f se debe recurrir a datos experimentales.

Las pruebas han mostrado que el número adimensional f depende de otras dos cantidades adimensionales, el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería. La rugosidad relativa es la relación del diámetro de la tubería D a la rugosidad promedio de su pared ϵ .

Uno de los métodos más extensamente empleados para evaluar el factor de fricción hace uso del diagrama de Moody que se presenta en la figura 10. El diagrama muestra el factor de fricción, f , graficado contra el número de Reynolds, N_r , con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa, D/ϵ .

Figura 10 Diagrama de Mody.



Fuente: Víctor L. Streeter, Mecánica de los fluidos, pág 184.

A partir de estas curvas se pueden hacer varias observaciones importantes:

1. Para un número de Reynolds dado de un flujo, conforme la rugosidad relativa (D/e) aumenta, el factor de fricción disminuye.
2. Para una cierta rugosidad relativa dada, D/e , el factor de fricción disminuye al aumentar el número de Reynolds, hasta que alcanza la zona de turbulencia completa.
3. Dentro de la zona de completa turbulencia, el número de Reynolds no tiene efecto alguno sobre el factor de fricción.
4. Conforme aumenta la rugosidad relativa, D/e , el valor del número de Reynolds, en el cual se inicia la zona de completa turbulencia, empieza a aumentar.

La ecuación siguiente, permite el cálculo directo del valor del factor de fricción para flujo turbulento, la desarrollaron P. K Swamee y A. K. Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ec. 9}$$

EJEMPLO 1:

Determinar la pérdida de energía si fluye glicerina, cuya densidad es 1258 kg/m^3 y viscosidad $0.96 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, por un tubo de 150 mm de diámetro y 30 m de longitud, a una velocidad promedio de 4 m/s .

Determinar si el flujo es laminar o turbulento

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta}$$

$$v = 4 \text{ m/s}$$

$$D = 0.15 \text{ m}$$

$$\rho = 1258 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta = 0.96 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Sustituyendo

$$N_R = \frac{(4)(0.15)(1258)}{0.96} = 786$$

Debido a que $N_R < 2000$, el flujo es laminar.

Con la ecuación de Darcy se obtiene:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$f = \frac{64}{N_R} = \frac{64}{786} = 0.081$$

$$h_L = 0.081 \frac{30 \text{ m}}{0.15 \text{ m}} \frac{(4 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 13.2 \text{ m}$$

EJEMPLO 2:

Determinar el factor de fricción para una tubería lisa, cuyo diámetro es de 4 cm y en la cual circula agua a 5.3 m/s cuya densidad es de 1000 kg/m³ y viscosidad cinemática es de 1.75×10^{-6} m²/s.

Determinar si el flujo es laminar o turbulento

$$N_R = \frac{vD}{\nu}$$

$$v = 5.3 \text{ m/s}$$

$$D = 0.04 \text{ m}$$

$$\eta = 1.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Sustituyendo

$$N_R = \frac{(5.3)(0.04)}{1.75 \times 10^{-6}} = 12.1 \times 10^4$$

Debido a que $N_R > 4000$, el flujo es turbulento.

- 1) Localizar en número de Reynolds en la abscisa del diagrama de Moody:

$$N_R = 12.1 \times 10^4$$

- 2) Hacer una proyección vertical hasta la curva de tubería lisa.
- 3) Realizar una proyección hacia la izquierda y se obtiene $f=0.016$

1.13 Ecuación de Hazen-Williams

La ecuación de Hazen-Williams es una de las más utilizadas para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. Su uso se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros mayores de 2 pulgadas y menores de 6 pies. La velocidad de flujo no debe exceder los 3.05 m/s. Asimismo, está elaborada para agua a 60°F. Su empleo con temperaturas mas bajas o altas ocasionaría cierto error.

La ecuación de Hazen-Williams es específica en cuanto a las unidades y proviene de una serie de ensayos de laboratorio. En el Sistema Ingles adopta la formula siguiente:

$$v = 1.32C_h R^{0.63} s^{0.54} \quad \text{Ec. 9}$$

donde:

v = Velocidad promedio del flujo (pies/s)

C_h = Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

R = Radio hidráulico del conducto de flujo (pies)

s = Relación h_L / L : pérdida de energía/longitud de conducto (pies/pies).

El uso del radio hidráulico en la fórmula permite su aplicación a secciones no circulares y también circulares. Para las secciones circulares se emplea $R=D/4$, donde D es el diámetro de la tubería.

El coeficiente C_h depende de la condición de la superficie de la tubería o conducto. La tabla III proporciona valores que son comunes.

Con unidades del Sistema Internacional, la ecuación de Hazen-Williams es

$$v = 0.85C_h R^{0.63} s^{0.54} \quad \text{Ec. 10}$$

donde:

v = Velocidad promedio del flujo (m/s)

C_h = Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

R = Radio hidráulico del conducto de flujo (m)

s = Relación h_L / L : pérdida de energía/longitud de conducto (m/m).

La ecuación de Hazen-Williams se puede transformar en una ecuación donde se puede calcular directamente la pérdida de energía a través de las siguientes sustituciones:

$$v = 0.85C_h R^{0.63} s^{0.54} \quad \text{Sustituyendo } Q = vA$$

$$vA = 0.85C_h R^{0.63} s^{0.54} A$$

$$Q = 0.85C_h R^{0.63} s^{0.54} A$$

$$Q = 0.85C_h R^{0.63} s^{0.54} \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)$$

$$Q = 0.6676C_h R^{0.63} s^{0.54} D^2$$

Sustituyendo $s = \frac{hf}{L}$ y $R = \frac{D}{4}$ (Conducto

$$Q = 0.6676C_h \left(\frac{D}{4} \right)^{0.63} \left(\frac{hf}{L} \right)^{0.54} D^2 \quad \text{circular a sección llena)$$

$$Q = \frac{0.2787C_h D^{2.63} hf^{0.54}}{L^{0.54}} \quad \text{Despejando } hf$$

$$hf^{0.54} = \frac{QL^{0.54}}{0.2787C_h D^{2.63}}$$

$$hf = \left(\frac{QL^{0.54}}{0.2787C_h D^{2.63}} \right)^{1/0.54}$$

$$hf = \frac{10.66Q^{1.85}L}{C_h D^{4.87}} \quad \text{Ec. 11}$$

donde:

Q = Caudal de flujo (m^3/s)

C_h = Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

L = Longitud de tubería (m)

D = Diámetro de tubería (m).

Tabla III. Coeficiente de Hazen-Williams C_h

Tipo de tubo	Promedio para tuberías nuevas y limpias	Valor de diseño
Acero, hierro dúctil o fundido con aplicación centrífuga de cemento o revestimiento bituminoso	150	140
Plástico, cobre, latón, vidrio	140	130
Acero, hierro fundido, sin recubrimiento	130	100
Concreto	120	100
Acero corrugado	60	60

Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de Fluidos Aplicada, pág. 244

EJEMPLO 3:

Calcular la pérdida de energía, provocada por el flujo de agua en una tubería de cobre, cuya longitud es de 100 metros, diámetro de 15 centímetros y caudal de $0.10\text{m}^3/\text{s}$.

$$C_h = 130 \text{ Tabla III}$$

$$D = 15\text{cm} = 0.15\text{m}$$

$$Q = 0.10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

Sustituyendo Ec. 11

$$hf = \frac{10.66Q^{1.85}L}{C_h D^{4.87}}$$

$$hf = \frac{10.66(0.10\text{m}^3 / \text{s})^{1.85} (100\text{m})}{130(0.15\text{m})^{4.87}}$$

$$hf = 1192\text{m}$$

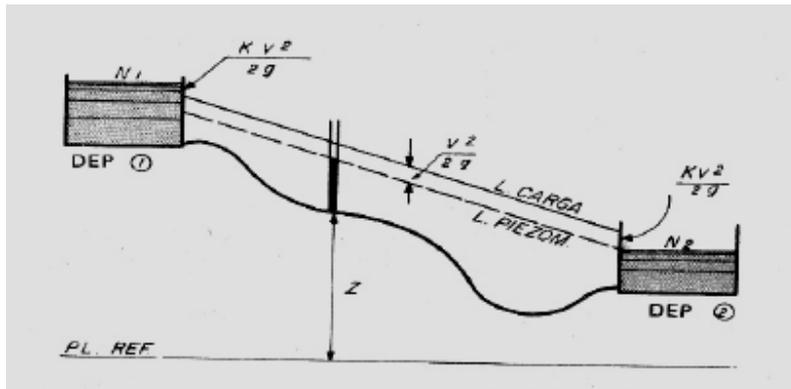
1.14 Línea de carga total y carga piezométrica

La línea de carga referente a una tubería es el lugar geométrico de los puntos representativos de las tres cargas; de velocidad, de presión y de posición. La línea piezométrica corresponde a las alturas a que el líquido subiría en piezómetros instalados a lo largo de la misma: es la línea de las presiones.

Las dos líneas están separadas del valor correspondiente al término $V^2/2g$, esto es, energía cinética o carga de velocidad.

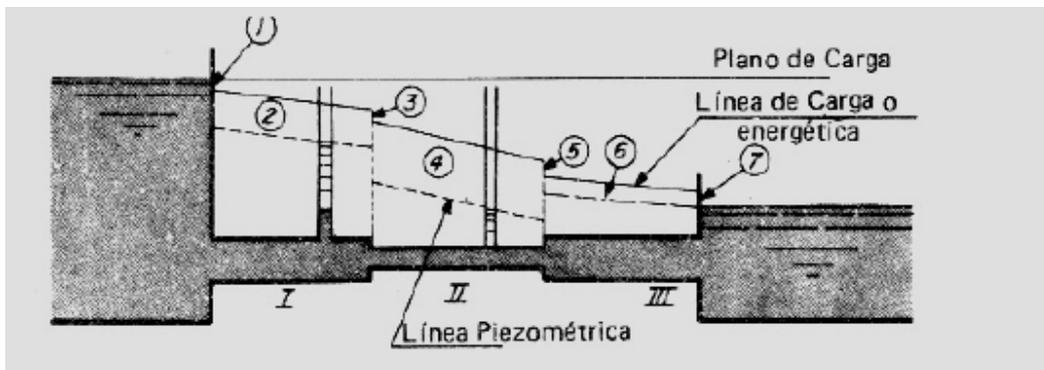
Si el diámetro del tubo fuese constante, la velocidad del líquido será constante y las dos líneas serán paralelas.

Figura 11 Línea piezométrica



Fuente: J. M. de Azevedo y Guillermo Acosta A. Manual de Hidráulica, pág. 223

Figura 12 Línea de carga



Fuente: J. M. de Azevedo y Guillermo Acosta A. Manual de Hidráulica, pág. 224

2. ENSAYO DE LABORATORIO

2.1 Descripción del equipo

El sistema de conducción consta de un circuito horizontal de tuberías de P.V.C de diámetros de $\frac{1}{2}$ pulgada, una serie de codos de 45° y 90°, válvulas de compuerta, válvulas de globo, tees y dos tanques de almacenamiento.

El sistema es suministrado por una bomba centrífuga de $\frac{1}{2}$ HP de potencia, regulando el caudal por una serie de válvulas en el caso se requiera ensayar el sistema por bombeo o por gravedad.

El sistema posee un tanque elevado de almacenamiento de aproximadamente 15 litros de capacidad, el cual es alimentado por la bomba anteriormente mencionada. Este tanque posee una tubería de rebalse de P.V.C de diámetro $1\frac{1}{2}$ pulgada con el objetivo de mantener constante el nivel del mismo. La altura libre del tanque hacia el nivel de referencia es de 1.25 metros de altura. El otro tanque se encuentra en la parte inferior del sistema con el objetivo de recibir el agua de rebalse provocada cuando el sistema es ensayado.

Se trabajó con 5 tomas piezométricas ubicadas estratégicamente, para observar y analizar considerablemente las pérdidas de energía de ciertos tramos, en los cuáles en algunos tramos existe pérdida por fricción y pérdidas localizadas definidas en conjunto por determinado número de accesorios, así como las pérdidas de las válvulas.

Los tubos piezométricos están formados por mangueras plásticas transparentes, de aproximadamente 1/8 de pulgada de diámetro, unidos a unos codos de cobre, los cuales unen los tubos piezométricos con los puntos mencionados anteriormente en el sistema. La medición de las alturas piezométricas están definidas a una escala de centímetros, teniendo el nivel de referencia el tablero horizontal de tuberías.

En total para la realización del sistema se utilizaron 6 codos de 45°, 14 codos de 90°, 10 m de tubería PVC, 4 tees, 3 válvulas de compuerta de tipo rosca y 2 válvulas de compuerta de tipo palanca y 3 válvulas de globo.

Definición de tomas piezométricas:

La toma piezométrica 1 está al inicio del sistema, empezando de izquierda a derecha.

La toma piezométrica 2 analiza la pérdida por fricción y pérdidas localizadas de un tramo que consta de 1.58 m de tubería de P.V.C y 10 codos de 90°.

La toma piezométrica 3 analiza la pérdidas localizadas de un tramo que contiene 6 codos de 45° y 4 codos de 90°.

La toma piezométrica 4 analiza la pérdida de presión provocada por una válvula de compuerta de rosca.

La toma piezométrica 5 analiza al pérdida de presión provocado por una válvula de compuerta de palanca.

Figura 13. Perfil del sistema

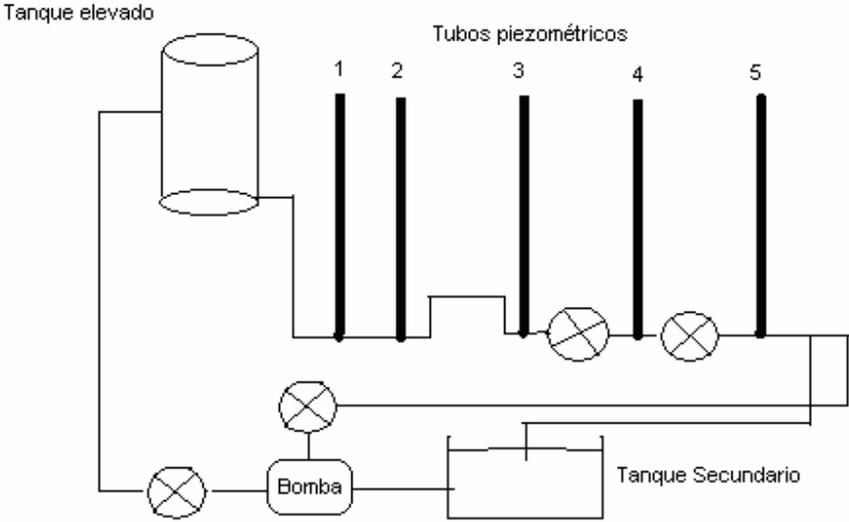


Figura 14. Vista lateral

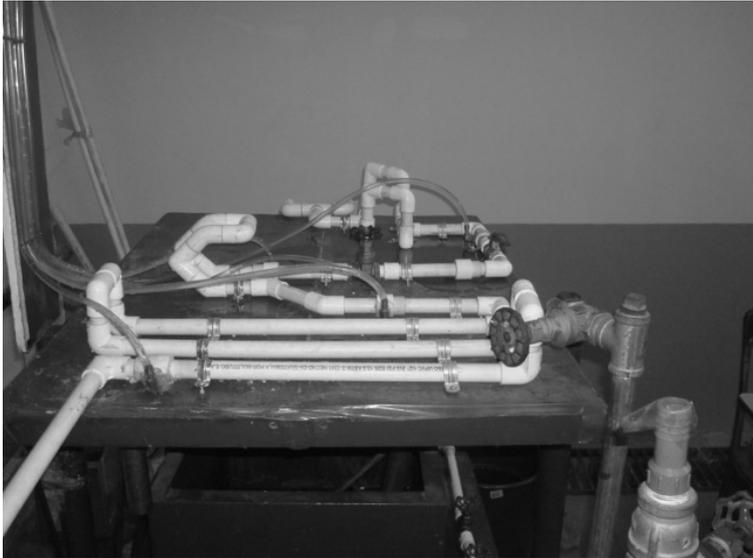


Figura 15. Sistema general

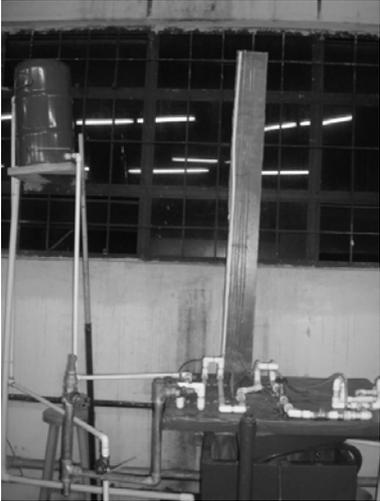
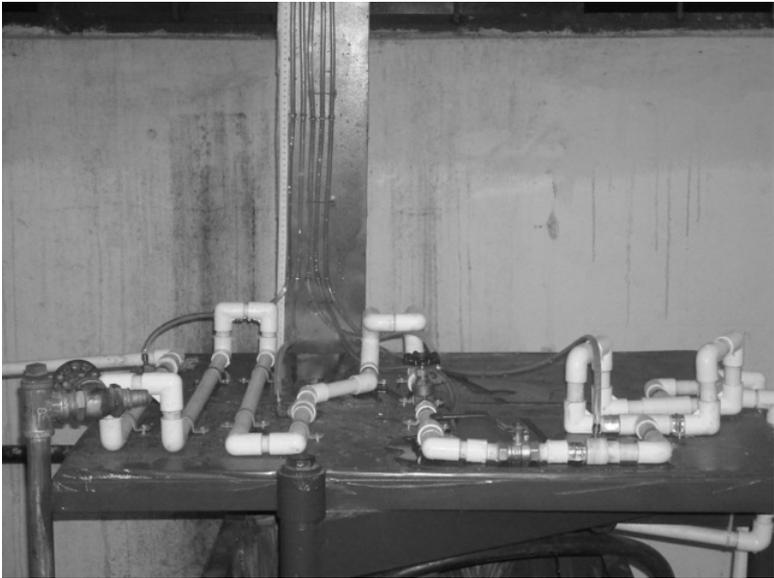


Figura 16. Circuito de sistema



2.2 Ensayo por gravedad

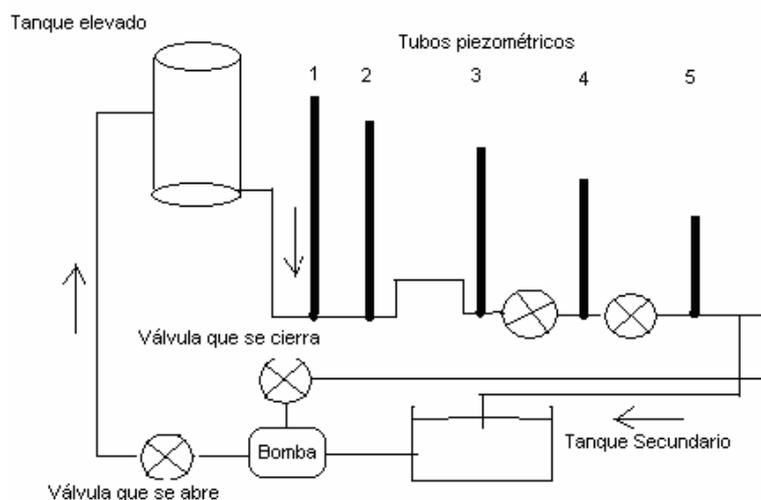
2.2.1 Objetivos

- Determinar la pérdida de energía en cada tramo analizado en función del caudal.
- Determinar la constante de pérdida de cada tramo.
- Trazar la línea de carga piezométrica y línea de carga total.
- Hacer una comparación teórica y práctica de las pérdidas
- Verificar si el comportamiento de la línea de carga total es similar a los modelos de conducción típicos.

2.2.2 Descripción del ensayo

Para analizar el sistema de conducción por gravedad, se cierra completamente la válvula de compuerta, ubicada en la parte superior de la bomba, lo que provoca que ésta conduzca el agua directamente hacia el tanque elevado hasta mantener un nivel constante.

Figura 17. **Sistema por gravedad**



2.2.3 Cálculos

1. Determinar el caudal de circulación en litros/segundo.

El caudal de aforo se hizo de forma volumétrica, tomando cinco tiempos para tener una mejor exactitud con un volumen patrón de 2.5 litros.

Tabla IV. **Tiempos obtenidos**

No.	Tiempo (s)	Volumen (l)
1	13.10	2.50
2	13.21	2.50
3	13.15	2.50
4	13.05	2.50
5	13.18	2.50

$$Q = V \left(\frac{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} + \frac{1}{t_5}}{5} \right)$$
$$Q = 2.5 \left(\frac{\frac{1}{13.10} + \frac{1}{13.21} + \frac{1}{13.15} + \frac{1}{13.05} + \frac{1}{13.18}}{5} \right)$$
$$Q = 0.19 \text{ l/s}$$

2. Cálculo de velocidad promedio de flujo en el sistema basado en la ecuación de continuidad.

$$v = \frac{Q}{A}$$

donde:

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Q = Caudal de aforo (m³/s)

A = Área de sección de tubería (m²)

Diámetro de tubería:

$$\frac{1}{2} \text{ plg} = 1.27 \text{ cm}$$

Área de sección:

$$A = \Pi/4D^2$$

$$A = \Pi/4(1.27\text{cm})^2$$

$$A = 1.27\text{cm}^2$$

$$A = 0.000127\text{m}^2$$

Velocidad:

$$V = Q/A$$

$$V = 0.00019\text{m}^3/\text{s} / 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V = 1.50 \text{ m/s}$$

3. Toma de carga piezométricas.

Las carga piezométricas son determinadas directamente por las alturas que presentan los tubos piezométricos en el sistema a escala de centímetros.

Tabla V. **Carga piezométrica**

Tubo Piezométrico	Carga Piezométrica (cm)
1	94 cm
2	53 cm
3	34 cm
4	29 cm
5	14 cm

4. Determinación de pérdida de energía por tramos.

La pérdida de energía por tramo se calcula como la resta algebraica de la cargas piezométricas ubicadas en cada tramo.

Tramo 1:

$$hf = \text{Toma piezométrica 1} - \text{Toma piezométrica 2}$$

$$hf = 94\text{cm} - 53\text{cm}$$

$$hf = 41\text{cm}$$

Tramo 2:

$$hf = \text{Toma piezométrica 2} - \text{Toma piezométrica 3}$$

$$hf = 53\text{cm} - 34\text{cm}$$

$$hf = 19\text{cm}$$

Tramo 3:

$$hf = \text{Toma piezométrica 3} - \text{Toma piezométrica 4}$$

$$hf = 34\text{cm} - 29\text{cm}$$

$$hf = 5\text{cm}$$

Tramo 4:

$$hf = \text{Toma piezométrica 4} - \text{Toma piezométrica 5}$$

$$hf = 29\text{cm} - 14\text{cm}$$

$$hf = 15\text{cm}$$

Tabla VI. **Pérdida de energía**

Tramo	Pérdida de energía (cm)
1	41
2	19
3	5
4	15

5. Determinación de la constante de pérdida k de cada tramo.

Las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de velocidad del fluido, conforme pasa por un codo, una contracción de la sección o por una válvula. Por lo general, los valores experimentales de las pérdidas de energía se reportan en términos de un coeficiente de pérdida K como sigue:

$$h_f = k \frac{v^2}{2g}$$
$$k = \frac{h_f 2g}{v^2}$$

donde:

k = Constante de pérdida (adimensional)

h_f = Pérdida de energía (m)

g = Gravedad (m/s²)

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

El coeficiente de pérdida de resistencia es adimensional debido a que representa una constante de proporcionalidad entre la pérdida de energía y la carga de velocidad. La magnitud del coeficiente de pérdida depende de la geometría del dispositivo y de la velocidad de flujo.

Por razones experimentales, el coeficiente de pérdida se determinó como un conjunto de accesorios en los tramos 1 y 2, mientras que en los tramos 3 y 4 se determinó directamente de las válvulas utilizadas.

Tramo 1:

$$hf = 0.41 \text{ m}$$

$$v = 1.50 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.41 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(1.50 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 3.5752$$

Tramo 2:

$$hf = 0.19 \text{ m}$$

$$v = 1.50 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.19 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(1.50 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 1.6568$$

Tramo 3:

$$hf = 0.05 \text{ m}$$

$$v = 1.50 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.05 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(1.50 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.4360$$

Tramo 4:

$$hf = 0.15 \text{ m}$$

$$v = 1.50 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.15m)^2(9.81m/s^2)}{(1.50m/s)^2}$$

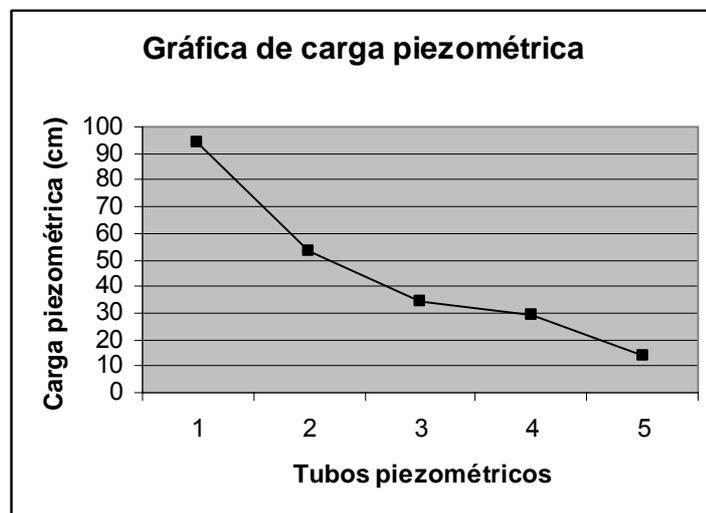
$$k = 1.3080$$

Tabla VII. **Determinación de k por tramo**

Tramo	v (m/s)	hf(m)	k
1	1.50	0.41	3.5752
2	1.50	0.19	1.6568
3	1.50	0.05	0.4360
4	1.50	0.15	1.3080

6. Línea de carga piezométrica

Figura 18. **Gráfica de carga piezométrica**



7. Línea de carga total

La altura de carga total se determina como la suma algebraica de la carga piezométrica más la carga de velocidad.

La carga de velocidad es la misma en todos los tramos debido a que la sección de la tubería es la misma en todo el sistema.

$$\begin{aligned}\text{Carga total (cm)} &= \text{Carga piezométrica} + \text{Carga de velocidad} \\ &= \text{Carga piezométrica} + v^2 / 2g\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Carga de velocidad} &= v^2 / 2g \\ &= (1.5\text{m/s})^2 / 2(9.81\text{m/s}^2) \\ &= 0.1147\text{m} \\ &= 11.47\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 1:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 94\text{cm} + 11.47\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 105.47\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 2:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 53\text{cm} + 11.47\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 64.47\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 3:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 34\text{cm} + 11.47\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 45.47\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 4:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 29\text{cm} + 11.47\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 40.47\text{cm}\end{aligned}$$

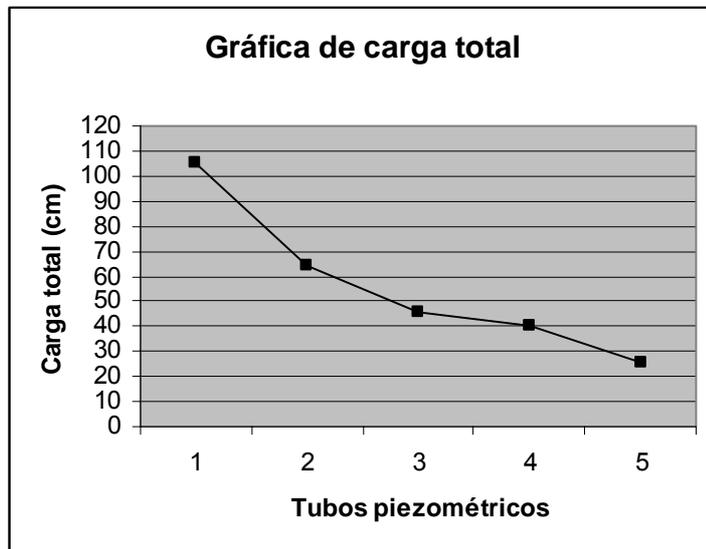
Toma 5:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 14\text{cm} + 11.47\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 25.47\text{cm}\end{aligned}$$

Tabla VIII. Determinación de carga total por tramo

Toma	Carga piezométrica (cm)	$v^2/2g$ (cm)	Carga total (cm)
1	94.00	11.47	105.47
2	53.00	11.47	64.47
3	34.00	11.47	45.47
4	29.00	11.47	40.47
5	14.00	11.47	25.47

Figura 19. Gráfica de carga total



8. Comparación teórica y práctica

8.1 Determinación del tipo de flujo

Viscosidad cinemática:

$$0.893E-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

Diámetro de tubería:

$$1.27 \text{ cm} = 0.0127 \text{ m}$$

Velocidad:

$$v = 1.5 \text{ m/s}$$

Calculo del número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD}{\nu}$$

$$N_R = (1.5 \text{ m/s})(0.0127 \text{ m}) / 0.893 \text{ E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N_R = 21332.59$$

Dado que $N_R > 4000$ el flujo es turbulento.

8.2 Determinación del factor de fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\epsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Datos:

$$D = 0.0127 \text{ m}$$

$$\epsilon = 3.0 \text{ E-}7 \text{ m Tubo plástico}$$

$$N_R = 21332.59$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(0.0127/3 \text{ E-}7)} + \frac{5.74}{21332.59^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{[\log(6.38 \text{ E-}6 + 729.08 \text{ E-}6)]^2}$$

$$f = 0.025$$

8.3 Determinación de pérdidas por tramos

Tramo 1: Existe 1.58 metros lineales de tubería P.V.C y 10 codos de 90 °.

Tramo 2: Existe 4 codos de 90 ° y 6 codos de 45 °.

Tramo 3: Existe una válvula de compuerta tipo rosca.

Tramo 4: Existe una válvula de compuerta tipo palanca.

Tabla IX. Cuantificación de accesorios por tramos

Tramo	Tubería	No. Codo 90°	No. Codo 45°	Válvula de compuerta
1	1.58 m	10		
2		4	6	
3				Rosca
4				Palanca

Aplicando la ecuación de Darcy:

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

Codo 90 °

$$K=0.5$$

$$V=1.5m/s$$

$$hf = 0.5 \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} = 0.0574m$$

$$hf = 5.74cm$$

Codo 45 °

$$K=0.35$$

$$V=1.5m/s$$

$$hf = 0.35 \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} = 0.0402m$$

$$hf = 4.02cm$$

Válvulas de compuerta

$$K=0.25$$

$$V=1.5m/s$$

$$hf = 0.25 \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} = 0.0287m$$

$$hf = 2.87cm$$

Tabla X. Pérdidas teóricas de cada accesorio

Accesorios	K	v (m/s)	Hf=kv ² /2g (cm)
Codos 90°	0.5	1.5	5.74
Codos 45°	0.35	1.5	4.02
válvulas compuerta	0.25	1.5	2.87

Tramo 1:

hf = Pérdida por fricción + pérdida localizadas

hf = Pérdida por fricción + 10*pérdida localizada codo 90°

$$hf = hf_{tuberia} + 10hl_{codo90}$$

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + 10k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.025 \frac{1.58m}{0.0127m} \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} + 10(0.5) \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)}$$

$$hf = 0.36m + 0.57m$$

$$hf = 0.93m$$

$$hf = 93cm$$

Tramo 2:

hf = Pérdidas localizadas

hf = 6*Pérdida localizada codo 45°+4 *Pérdida localizada codo 90°

$$hf = 6hl_{codo45} + 4hl_{codo90}$$

$$hf = 6k \frac{v^2}{2g} + 4k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 6(0.35) \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s)} + 4(0.5) \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s)}$$

$$hf = 0.24m + 0.45m$$

$$hf = 0.69m$$

$$hf = 69cm$$

Tramo 3:

hf = Pérdida localizada

hf = Pérdida localizada por válvula

$$hf = hl_{\text{válvula}}$$

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.25 \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)}$$

$$hf = 0.03m$$

$$hf = 3cm$$

Tramo 4:

hf = Pérdida localizada

hf = Pérdida localizada por válvula

$$hf = hl_{\text{válvula}}$$

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.25 \frac{(1.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)}$$

$$hf = 0.03m$$

$$hf = 3cm$$

Tabla XI. **Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas**

Tramo	Hf teórica (cm)	Hf práctico (cm)
1	93	41
2	69	19
3	3	5
4	3	15

2.3 Ensayo por bombeo

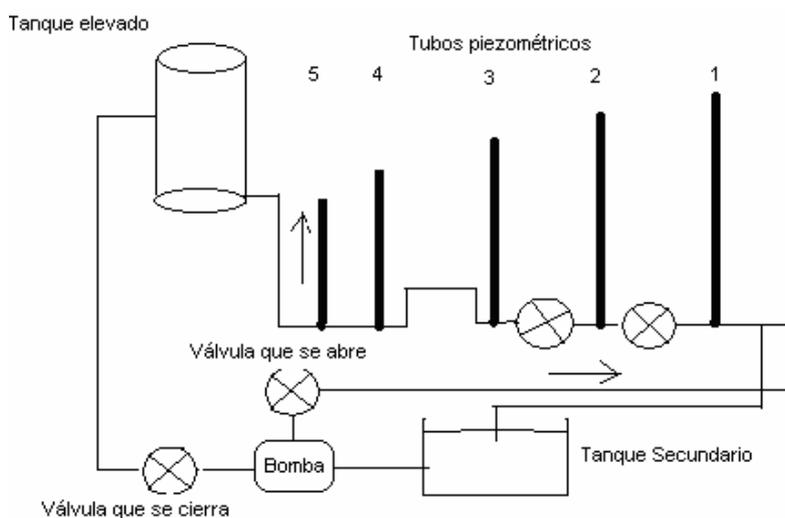
3.3.1 Objetivos

- Determinar la pérdida de energía en cada tramo analizado.
- Determinar la constante k de cada tramo.
- Trazar la línea de carga piezométrica y línea de carga total.
- Hacer una comparación teórica y práctica de las pérdidas
- Verificar si el comportamiento de la línea de carga total es similar a los modelos de conducción típicos.

3.3.2 Descripción del ensayo

Para analizar el sistema de conducción por bombeo, se cierra completamente la válvula de compuerta, lo que provoca que la bomba conduzca el agua directamente del sistema hacia el tanque hasta mantener un nivel constante. La circulación de flujo en el análisis por bombeo se da contrariamente a la dirección de flujo presentado en el sistema por gravedad.

Figura 20. Sistema por bombeo



2.3.3 Cálculos

1. Determinar el caudal de circulación en litros/segundo.

El caudal de aforo se hizo de forma volumétrica tomando cinco tiempos para tener una mejor exactitud con un volumen patrón de 2.5 litros, a partir de la tubería de rebalse.

Tabla XII. **Tiempos obtenidos**

No.	Tiempo (s)	Volumen (l)
1	8.15	2.50
2	8.10	2.50
3	8.13	2.50
4	8.12	2.50
5	8.14	2.50

$$Q = V \left(\frac{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} + \frac{1}{t_5}}{5} \right)$$

$$Q = 2.5 \left(\frac{\frac{1}{8.15} + \frac{1}{8.10} + \frac{1}{8.13} + \frac{1}{8.12} + \frac{1}{8.14}}{5} \right)$$

$$Q = 0.31 \text{ l/s}$$

2. Calculo de velocidad promedio de flujo en el sistema basado en la ecuación de continuidad.

$$v = \frac{Q}{A}$$

donde:

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Q = Caudal de aforo (m³/s)

A = Área de sección de tubería (m²)

Diámetro de tubería

$$\frac{1}{2} \text{ plg} = 1.27 \text{ cm}$$

Área de sección:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (1.27 \text{ cm})^2$$

$$A = 1.27 \text{ cm}^2$$

$$A = 0.000127 \text{ m}^2$$

Velocidad:

$$V = Q/A$$

$$V = 0.00031 \text{ m}^3/\text{s} / 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V = 2.44 \text{ m/s}$$

3. Toma de alturas piezométricas.

Las carga piezométricas son determinadas directamente por las alturas que presentan los tubos piezométricos en el sistema a escala de centímetros.

Tabla XIII. **Carga piezométrica**

Tubo piezométrico	Carga piezométrica (cm)
5	50
4	100
3	115
2	125
1	148

4. Determinación de pérdida de energía por tramos.

La pérdida de energía por tramo se calcula como la resta algebraica de la cargas piezométricas ubicadas en cada tramo.

Tramo 1:

$$hf = \text{Toma piezométrica 4} - \text{Toma piezométrica 5}$$

$$hf = 100\text{cm} - 50\text{cm}$$

$$hf = 50\text{cm}$$

Tramo 2:

$$hf = \text{Toma piezométrica 3} - \text{Toma piezométrica 4}$$

$$hf = 115\text{cm} - 100\text{cm}$$

$$hf = 15\text{cm}$$

Tramo 3:

$$hf = \text{Toma piezométrica 2} - \text{Toma piezométrica 3}$$

$$hf = 125\text{cm} - 115\text{cm}$$

$$hf = 10\text{cm}$$

Tramo 4:

$$hf = \text{Toma piezométrica 1} - \text{Toma piezométrica 2}$$

$$hf = 148\text{cm} - 125\text{cm}$$

$$hf = 23\text{cm}$$

Tabla XIV. **Pérdida de energía**

Tramo	Pérdida de energía (cm)
1	50
2	15
3	10
4	23

5. Determinación de k por tramo.

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

$$k = \frac{h_f 2g}{v^2}$$

donde

k = Constante de pérdida (adimensional)

hf = Pérdida de energía (m)

g = Gravedad (m/s²)

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Tramo 1:

$$hf = 0.50 \text{ m}$$

$$v = 2.44 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.50\text{m})^2(9.81\text{m} / \text{s}^2)}{(2.44\text{m} / \text{s})^2}$$

$$k = 1.6477$$

Tramo 2:

$$hf = 0.15 \text{ m}$$

$$v = 2.44 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.15\text{m})^2(9.81\text{m} / \text{s}^2)}{(2.44\text{m} / \text{s})^2}$$

$$k = 0.4943$$

Tramo 3:

$$hf = 0.10 \text{ m}$$

$$v = 2.44 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.10 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(2.44 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.3295$$

Tramo 4:

$$hf = 0.23 \text{ m}$$

$$v = 2.44 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.23 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(2.44 \text{ m/s})^2}$$

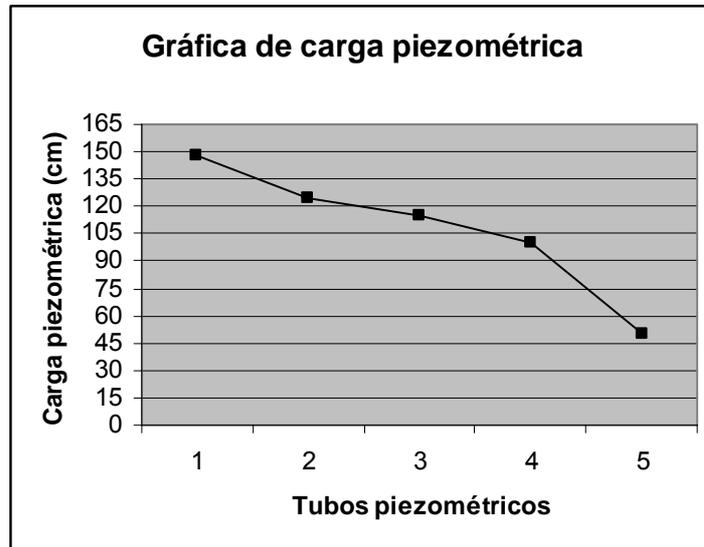
$$k = 0.7580$$

Tabla XV. Determinación de k por tramo

Tramo	v (m/s)	hf(m)	k
1	2.44	0.50	1.6477
2	2.44	0.15	0.4943
3	2.44	0.10	0.3295
4	2.44	0.23	0.7580

6. Línea de carga piezométrica

Figura 21. **Gráfica de carga piezométrica**



6. Línea de carga total

La altura de carga total se determina como la suma algebraica de la carga piezométrica más la carga de velocidad.

La carga de velocidad es la misma en todos los tramos debido a que la sección de la tubería es la misma en todo el sistema.

Carga total (cm) = Carga piezométrica + Carga de velocidad

$$= \text{Carga piezométrica} + v^2 / 2g$$

Carga de velocidad = $v^2 / 2g$

$$= (2.44\text{m/s})^2 / 2(9.81\text{m/s}^2)$$

$$= 0.3038\text{m}$$

$$= 30.38\text{cm}$$

Toma 1:

Carga total = 50cm + 30.38cm

Carga total = 80.38cm

Toma 2:

Carga total = 100cm + 30.38cm

Carga total = 130.38cm

Toma 3:

Carga total = 115cm + 30.38cm

Carga total = 145.38cm

Toma 4:

Carga total = 125cm + 30.38cm

Carga total = 155.38cm

Toma 5:

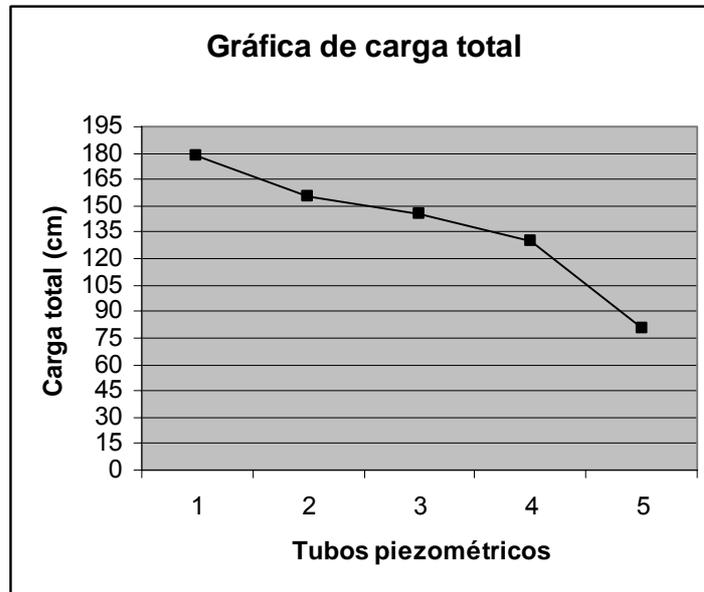
Carga total = 148cm + 30.38cm

Carga total = 178.38cm

Tabla XVI. **Determinación de carga total por tramo**

Toma	Carga piezométrica (cm)	$v^2/2g$(cm)	Carga total (cm)
5	50.00	30.38	80.38
4	100.00	30.38	130.38
3	115.00	30.38	145.38
2	125.00	30.38	155.38
1	148.00	30.38	178.38

Figura 22. Gráfica de carga total



8. Comparación teórica y práctica

8.1 Determinación del tipo de flujo

Viscosidad cinemática:

$$0.893E-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

Diámetro de tubería:

$$1.27 \text{ cm} = 0.0127 \text{ m}$$

Velocidad:

$$v = 2.44 \text{ m/s}$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD}{\nu}$$

$$N_R = (2.44 \text{ m/s})(0.0127 \text{ m}) / 0.893E-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N_R = 34,701$$

Dado que $N_R > 4000$ el flujo es turbulento.

8.2 Determinación del factor de fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Datos:

D=0.0127 m

$\varepsilon=3.0E-7$ m Tubo plástico

$N_R=34701$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(0.0127/3E-7)} + \frac{5.74}{34701^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{[\log(6.38E-6 + 470.55E-6)]^2}$$

$$f = 0.023$$

8.3 Determinación de pérdidas

Tramo 1: Existe 1.58 metros lineales de tubería P.V.C y 10 codos de 90 °.

Tramo 2: Existe 4 codos de 90 ° y 6 codos de 45 °.

Tramo 3: Existe una válvula de compuerta tipo rosca.

Tramo 4: Existe una válvula de compuerta tipo palanca.

Tabla XVII. **Cuantificación de accesorios por tramos**

Tramo	Tubería	No. Codo 90°	No. Codo 45°	Válvula de compuerta
1	1.58 m	10		
2		4	6	
3				Rosca
4				Palanca

Aplicando la ecuación de Darcy:

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

Codo 90 °

$$K=0.5$$

$$V=2.44\text{m/s}$$

$$hf = 0.5 \frac{(2.44\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m/s}^2)} = 0.1517\text{m}$$

$$hf = 15.17\text{cm}$$

Codo 45 °

$$K=0.35$$

$$V=2.44\text{m/s}$$

$$hf = 0.35 \frac{(2.44\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m/s}^2)} = 0.1062\text{m}$$

$$hf = 10.62\text{cm}$$

Válvulas de compuerta

$$K=0.25$$

$$V=2.44\text{m/s}$$

$$hf = 0.25 \frac{(2.44\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m/s}^2)} = 0.0759\text{m}$$

$$hf = 7.59\text{cm}$$

Tabla XVIII. Pérdidas teóricas de cada accesorio

Accesorios	K	v (m/s)	Hf=kv ² /2g (cm)
Codos 90°	0.5	2.44	15.17
Codos 45°	0.35	2.44	10.62
válvulas compuerta	0.25	2.44	7.59

Tramo 1:

hf = Pérdida por fricción + pérdida localizadas

hf = Pérdida por fricción + 10*pérdida localizada codo 90°

$$hf = hf_{tuberia} + 10hl_{codo90}$$

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + 10k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.023 \frac{1.58m}{0.0127m} \frac{(2.44m/s)^2}{2(9.81m/s)} + 10(0.5) \frac{(2.44m/s)^2}{2(9.81m/s)}$$

$$hf = 0.87m + 1.52m$$

$$hf = 2.39m$$

$$hf = 239cm$$

Tramo 2:

hf = Pérdidas localizadas

hf = 6*Pérdida localizada codo 45°+4 *Pérdida localizada codo 90°

$$hf = 6hl_{codo45} + 4hl_{codo90}$$

$$hf = 6k \frac{v^2}{2g} + 10k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 6(0.35) \frac{(2.44m/s)^2}{2(9.81m/s)} + 4(0.5) \frac{(2.44m/s)^2}{2(9.81m/s)}$$

$$hf = 0.63m + 0.61m$$

$$hf = 1.24m$$

$$hf = 124cm$$

Tramo 3:

hf = Pérdida localizada

hf = Pérdida localizada por válvula

$$hf = hl_{\text{válvula}}$$

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.25 \frac{(2.44m / s)^2}{2(9.81m / s^2)}$$

$$hf = 0.075m$$

$$hf = 7.5cm$$

Tramo 4:

hf = Pérdida localizada

hf = Pérdida localizada por válvula

$$hf = hl_{\text{válvula}}$$

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.25 \frac{(2.44m / s)^2}{2(9.81m / s^2)}$$

$$hf = 0.075m$$

$$hf = 7.5cm$$

Tabla XIX. **Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas**

Tramo	Hf teórica (cm)	Hf práctico (cm)
1	239	50
2	124	15
3	7.5	10
4	7.5	23

2.4 Ensayo de pérdida por fricción en tubería por gravedad

2.4.1 Objetivos

- Determinar la pérdida de energía en cada tramo analizado en función del caudal.
- Determinar la constante de pérdida de cada tramo.
- Trazar la línea de carga piezométrica y línea de carga total.
- Hacer una comparación teórica y práctica de las pérdidas por fricción y factores de fricción.

2.4.2 Descripción del ensayo

Para analizar la pérdida de energía por fricción en una tubería, se cierra completamente la válvula de compuerta ubicada en la parte superior de la bomba, lo que provoca que ésta conduzca el agua directamente hacia el tanque elevado hasta mantener un nivel constante, como se indicó en el ensayo anterior por gravedad. Los tramos que existen entre cada tubo piezométrico miden 22.5 cm.

Figura 23. Esquema de tubería PVC

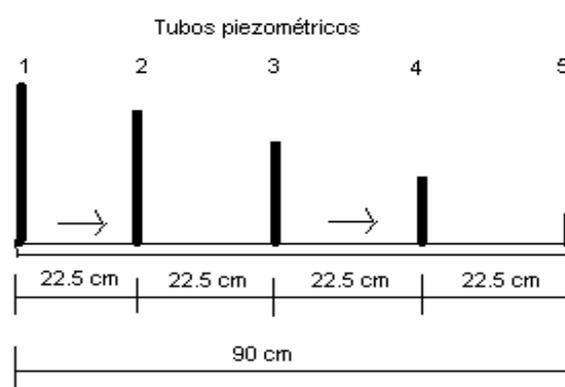


Figura 24. Tubería PVC



2.4.3 Cálculos

1. Determinar el caudal de circulación en litros/segundo.

El caudal de aforo se hizo de forma volumétrica tomando cinco tiempos para tener una mejor exactitud con un volumen patrón de 3 litros, a partir de la tubería de rebalse.

Tabla XX. Tiempos obtenidos

No.	Tiempo (s)	Volumen (l)
1	17.15	3.00
2	17.10	3.00
3	16.90	3.00
4	17.22	3.00
5	17.30	3.00

$$Q = V \left(\frac{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} + \frac{1}{t_5}}{5} \right)$$

$$Q = 3 \left(\frac{\frac{1}{17.15} + \frac{1}{17.10} + \frac{1}{16.90} + \frac{1}{17.22} + \frac{1}{17.30}}{5} \right)$$

$$Q = 0.18 \text{ l/s}$$

2. Cálculo de velocidad promedio de flujo en el sistema basado en la ecuación de continuidad.

$$v = \frac{Q}{A}$$

donde:

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Q = Caudal de aforo (m³/s)

A = Área de sección de tubería (m²)

Diámetro de tubería

$$\frac{1}{2} \text{ plg} = 1.27 \text{ cm}$$

Área de sección:

$$A = \Pi/4D^2$$

$$A = \Pi/4(1.27\text{cm})^2$$

$$A = 1.27\text{cm}^2$$

$$A = 0.000127\text{m}^2$$

Velocidad:

$$V = Q/A$$

$$V = 0.00018\text{m}^3/\text{s} / 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V = 1.42 \text{ m/s}$$

3. Toma de alturas piezométricas.

Las carga piezométricas son determinadas directamente por las alturas que presentan los tubos piezométricos en el sistema a escala de centímetros.

Tabla XXI. Carga piezométrica

Tubo piezométrico	Carga piezométrica (cm)
1	10
2	8.0
3	5.5
4	3.0
5	1.5

4. Determinación de pérdida energía por fricción por tramos de tubería.

La pérdida de energía por tramo se calcula como la resta algebraica de la cargas piezométricas ubicadas en cada tramo.

Tramo 1:

$$hf = \text{Toma piezométrica 4} - \text{Toma piezométrica 5}$$

$$hf = 10\text{cm} - 8\text{cm}$$

$$hf = 2\text{cm}$$

Tramo 2:

$$hf = \text{Toma piezométrica 3} - \text{Toma piezométrica 4}$$

$$hf = 8\text{cm} - 5.5\text{cm}$$

$$hf = 2.5\text{cm}$$

Tramo 3:

$$hf = \text{Toma piezométrica 2} - \text{Toma piezométrica 3}$$

$$hf = 5.5\text{cm} - 3\text{cm}$$

$$hf = 2.5\text{cm}$$

Tramo 4:

$$h_f = \text{Toma piezométrica 1} - \text{Toma piezométrica 2}$$

$$h_f = 3\text{cm} - 1.5\text{cm}$$

$$h_f = 1.5\text{cm}$$

Tabla XXII. Pérdida de energía

Tramo	Pérdida de energía (cm)
1	2
2	2.5
3	2.5
4	1.5

4. Determinación de k por tramo de tubería.

El coeficiente de pérdida de resistencia es adimensional debido a que representa una constante de proporcionalidad entre la pérdida de energía y la carga de velocidad. La magnitud del coeficiente de pérdida depende del tipo de tubería y de la velocidad de flujo.

Por razones experimentales, el coeficiente de pérdida se definió en 4 tramos simétricos a lo largo de la tubería PVC, teniendo cada uno 22.5 cm de longitud.

$$h_f = k \frac{v^2}{2g}$$

$$k = \frac{h_f 2g}{v^2}$$

donde:

k = Constante de pérdida (adimensional)

h_f = Pérdida de energía (m)

g = Gravedad (m/s^2)

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Tramo 1:

$$h_f = 0.02 \text{ m}$$

$$v = 1.42 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.02 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(1.42 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.195$$

Tramo 2:

$$h_f = 0.025 \text{ m}$$

$$v = 1.42 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.025 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(1.42 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.243$$

Tramo 3:

$$h_f = 0.025 \text{ m}$$

$$v = 1.42 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.025 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(1.42 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.243$$

Tramo 4:

$$hf = 0.015\text{ m}$$

$$v = 1.42\text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.015\text{ m})^2(9.81\text{ m/s}^2)}{(1.42\text{ m/s})^2}$$

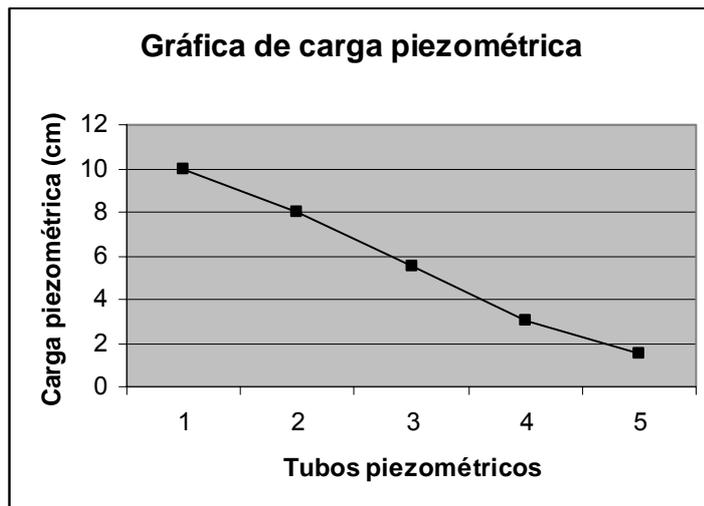
$$k = 0.146$$

Tabla XXIII. Determinación de k por tramo

Tramo	v (m/s)	hf(m)	k
1	1.42	0.02	0.195
2	1.42	0.025	0.243
3	1.42	0.025	0.243
4	1.42	0.015	0.146

6. Línea de carga piezométrica

Figura 25. Gráfica de carga piezométrica



7. Línea de carga total

La altura de carga total se determina como la suma algebraica de la carga piezométrica más la carga de velocidad.

La carga de velocidad es la misma en todos los tramos debido a que la sección de la tubería es la misma en todo el sistema.

$$\begin{aligned}\text{Carga total (cm)} &= \text{Carga piezométrica} + \text{Carga de velocidad} \\ &= \text{Carga piezométrica} + v^2 / 2g\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Carga de velocidad} &= v^2 / 2g \\ &= (1.42\text{m/s})^2 / 2(9.81\text{m/s}^2) \\ &= 0.1028\text{m} \\ &= 10.28\text{cm}\end{aligned}$$

Toma1:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 10\text{cm} + 10.28\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 20.28\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 2:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 8\text{cm} + 10.28\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 18.28\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 3:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 5.5\text{cm} + 10.28\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 15.78\text{cm}\end{aligned}$$

Toma 4:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 3\text{cm} + 10.28\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 13.28\text{cm}\end{aligned}$$

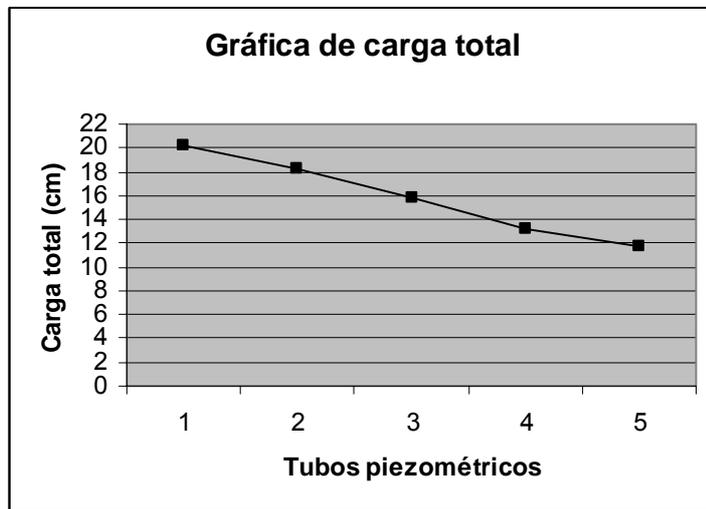
Toma 5:

$$\begin{aligned}\text{Carga total} &= 1.5\text{cm} + 10.28\text{cm} \\ \text{Carga total} &= 11.78\text{cm}\end{aligned}$$

Tabla XXIV. Determinación de carga total por tramo

Toma	Carga piezométrica (cm)	$v^2/2g$ (cm)	Carga total (cm)
1	10.00	10.28	20.28
2	8.00	10.28	18.28
3	5.500	10.28	15.78
4	3.00	10.28	13.28
5	1.50	10.28	11.78

Figura 26. Gráfica de carga total



8. Comparación teórica y práctica

8.1 Determinación del tipo de flujo

Viscosidad cinemática:

$$0.893E-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

Diámetro de tubería:

$$1.27 \text{ cm} = 0.0127 \text{ m}$$

Velocidad:

$$v = 1.42 \text{ m/s}$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD}{\nu}$$

$$N_R = (1.42 \text{ m/s})(0.0127\text{m})/0.893\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N_R = 20,195$$

Dado que $N_R > 4000$ el flujo es turbulento.

8.2 Determinación del factor de fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\epsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Datos:

$$D = 0.0127 \text{ m}$$

$$\epsilon = 3.0\text{E-}7 \text{ m Tubo plástico}$$

$$N_R = 20195$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(0.0127 / 3\text{E} - 7)} + \frac{5.74}{20195^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{[\log(6.38\text{E} - 6 + 765.94\text{E} - 6)]^2}$$

$$f = 0.026$$

8.3 Determinación de pérdidas

Aplicando la ecuación de Darcy:

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

hf = Pérdida por fricción

$$hf = hf_{tuberia}$$

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.026 \frac{0.225m}{0.0127m} \frac{(1.42m/s)^2}{2(9.81m/s)}$$

$$hf = 0.047m$$

$$hf = 4.73cm$$

Debido a la simetría de las tomas piezométricas, la pérdida de energía teórica es la misma en todos los tramos.

Tabla XXV. **Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas**

Tramo	Hf teórica (cm)	Hf práctico (cm)
1	4.73	2
2	4.73	2.5
3	4.73	2.5
4	4.73	1.5

8.4 Comparación f teórico y práctico

Factor de fricción teórico

$$f=0.026$$

Factor de fricción práctico

$$f = k \frac{D}{L}$$

$$k = \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{4}$$

$$k = \frac{0.195 + 0.243 + 0.243 + 0.146}{4}$$

$$k = 0.2068$$

$$D=1.27 \text{ cm}$$

$$L=22.5 \text{ cm}$$

$$f = 0.2068 \frac{1.27}{22.5}$$

$$f = 0.012$$

2.5 Ensayo de pérdida por fricción en tubería por bombeo

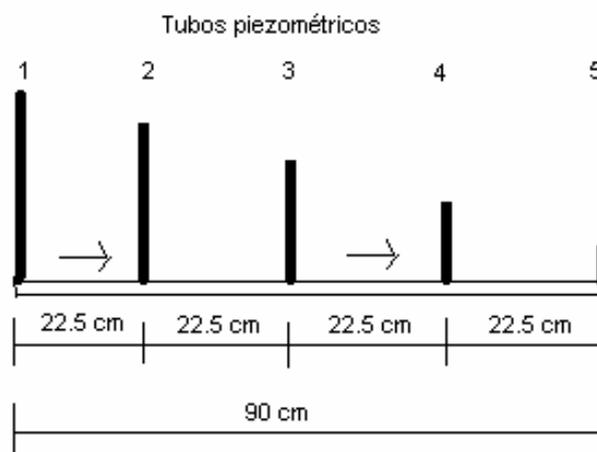
2.5.1 Objetivos

- Determinar la pérdida de energía en cada tramo analizado en función del caudal.
- Determinar la constante de pérdida de cada tramo.
- Trazar la línea de carga piezométrica y línea de carga total.
- Hacer una comparación teórica y práctica de las pérdidas por fricción y factores de fricción.

2.5.2 Descripción del ensayo

Para analizar la pérdida de energía por fricción en una tubería, se cierra completamente la válvula de compuerta ubicada en la parte superior de la bomba, lo que provoca que ésta conduzca el agua directamente hacia el tanque elevado hasta mantener un nivel constante, como se indicó en el ensayo anterior por bombeo. Los tramos que existen entre cada tubo piezométrico miden 22.5 cm.

Figura 27. Esquema de tubería PVC



2.5.3 Cálculos

1. Determinar el caudal de circulación en litros/segundo.

El caudal de aforo se hizo de forma volumétrica tomando cinco tiempos para tener una mejor exactitud con un volumen patrón de 3 litros, a partir de la tubería de rebalse.

Tabla XXVI. Tiempos obtenidos

No.	Tiempo (s)	Volumen (l)
1	10.25	3.00
2	10.20	3.00
3	10.05	3.00
4	10.45	3.00
5	10.15	3.00

$$Q = V \left(\frac{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} + \frac{1}{t_5}}{5} \right)$$
$$Q = 3 \left(\frac{\frac{1}{10.25} + \frac{1}{10.20} + \frac{1}{10.05} + \frac{1}{10.45} + \frac{1}{10.15}}{5} \right)$$
$$Q = 0.29 \text{ l/s}$$

2. Cálculo de velocidad promedio de flujo en el sistema basado en la ecuación de continuidad.

$$v = \frac{Q}{A}$$

donde:

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Q = Caudal de aforo (m³/s)

A = Área de sección de tubería (m²)

Diámetro de tubería

$$\frac{1}{2} \text{ plg} = 1.27 \text{ cm}$$

Área de sección:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} (1.27 \text{ cm})^2$$

$$A = 1.27 \text{ cm}^2$$

$$A = 0.000127 \text{ m}^2$$

Velocidad:

$$V = Q/A$$

$$V = 0.00029 \text{ m}^3/\text{s} / 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V = 2.28 \text{ m/s}$$

3. Toma de alturas piezométricas.

Las carga piezométricas son determinadas directamente por las alturas que presentan los tubos piezométricos en el sistema a escala de centímetros.

Tabla XXVII. **Carga piezométrica**

Tubo piezométrico	Carga piezométrica (cm)
1	23
2	18
3	15
4	10
5	6

4. Determinación de pérdida energía por fricción por tramos de tubería.

La pérdida de energía por tramo se calcula como la resta algebraica de la cargas piezométricas ubicadas en cada tramo.

Tramo 1:

$$hf = \text{Toma piezométrica 4} - \text{Toma piezométrica 5}$$

$$hf = 23\text{cm} - 18\text{cm}$$

$$hf = 5\text{cm}$$

Tramo 2:

$$hf = \text{Toma piezométrica 3} - \text{Toma piezométrica 4}$$

$$hf = 18\text{cm} - 15\text{cm}$$

$$hf = 3\text{cm}$$

Tramo 3:

$$hf = \text{Toma piezométrica 2} - \text{Toma piezométrica 3}$$

$$hf = 15\text{cm} - 10\text{cm}$$

$$hf = 5\text{cm}$$

Tramo 4:

$$hf = \text{Toma piezométrica 1} - \text{Toma piezométrica 2}$$

$$hf = 10\text{cm} - 6\text{cm}$$

$$hf = 4\text{cm}$$

Tabla XXVIII. **Pérdida de energía**

Tramo	Pérdida de energía (cm)
1	5
2	3
3	5
4	4

5. Determinación de k por tramo de tubería.

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$
$$k = \frac{hf \cdot 2g}{v^2}$$

donde:

k = Constante de pérdida (adimensional)

hf = Pérdida de energía (m)

g = Gravedad (m/s^2)

v = Velocidad promedio de flujo (m/s)

Tramo 1:

$$hf = 0.05 \text{ m}$$

$$v = 2.28 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.05 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(2.28 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.189$$

Tramo 2:

$$hf = 0.03 \text{ m}$$

$$v = 2.28 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.03 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(2.28 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.113$$

Tramo 3:

$$hf = 0.05 \text{ m}$$

$$v = 2.28 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.05 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(2.28 \text{ m/s})^2}$$

$$k = 0.189$$

Tramo 4:

$$hf = 0.04 \text{ m}$$

$$v = 2.28 \text{ m/s}$$

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

$$k = \frac{(0.04 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)}{(2.28 \text{ m/s})^2}$$

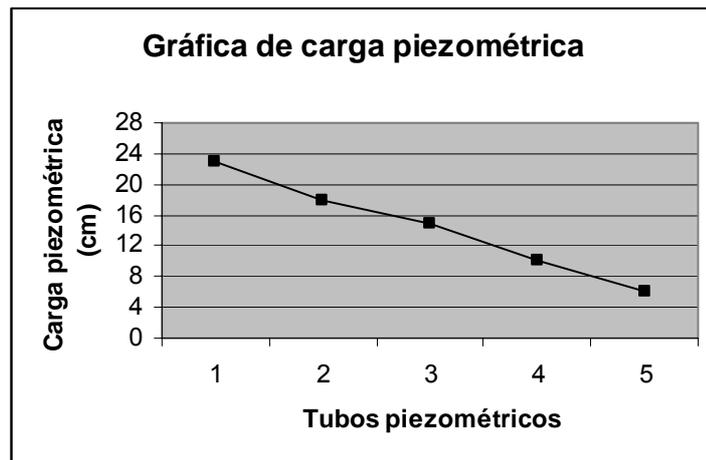
$$k = 0.151$$

Tabla XXIX. Determinación de k por tramo

Tramo	v (m/s)	hf(m)	k
1	2.28	0.05	0.189
2	2.28	0.03	0.113
3	2.28	0.05	0.189
4	2.28	0.04	0.151

6. Línea de carga piezométrica

Figura 28. **Gráfica de carga piezométrica**



7. Línea de carga total

La altura de carga total se determina como la suma algebraica de la carga piezométrica más la carga de velocidad.

La carga de velocidad es la misma en todos los tramos debido a que la sección de la tubería es la misma en todo el sistema.

Carga total (cm) = Carga piezométrica + Carga de velocidad

$$= \text{Carga piezométrica} + v^2 / 2g$$

Carga de velocidad = $v^2 / 2g$

$$= (2.28\text{m/s})^2 / 2(9.81\text{m/s}^2)$$

$$= 0.2650\text{m}$$

$$= 26.50\text{cm}$$

Tramo 1:

$$\text{Carga total} = 23\text{cm} + 26.50\text{cm}$$

$$\text{Carga total} = 49.50\text{cm}$$

Tramo 2:

$$\text{Carga total} = 18\text{cm} + 26.50\text{cm}$$

$$\text{Carga total} = 44.5\text{cm}$$

Tramo 3:

$$\text{Carga total} = 15\text{cm} + 26.50\text{cm}$$

$$\text{Carga total} = 41.5\text{cm}$$

Tramo 4:

$$\text{Carga total} = 10\text{cm} + 26.50\text{cm}$$

$$\text{Carga total} = 36.5\text{cm}$$

Tramo 5:

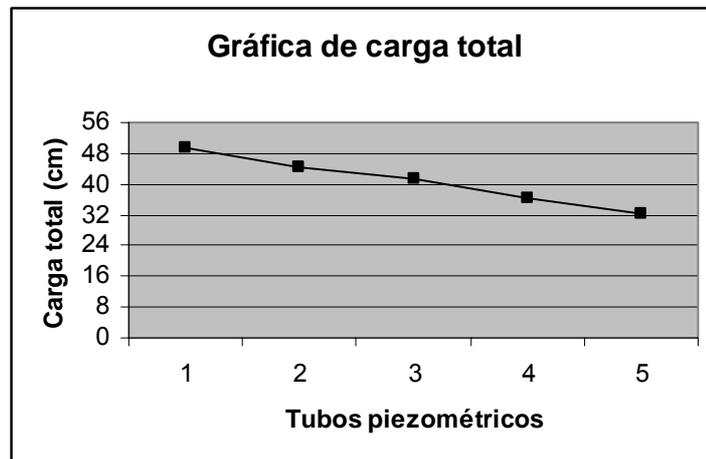
$$\text{Carga total} = 6\text{cm} + 26.50\text{cm}$$

$$\text{Carga total} = 32.5\text{cm}$$

Tabla XXX. **Determinación de carga total por tramo**

Tramo	Carga piezométrica (cm)	$v^2/2g(\text{cm})$	Carga total (cm)
1	23	26.50	49.50
2	18	26.50	44.50
3	15	26.50	41.50
4	10	26.50	36.50
5	6	26.50	32.50

Figura 29. Gráfica de carga total



8. Comparación teórica y práctica

8.1 Determinación del tipo de flujo

Viscosidad cinemática:

$$0.893E-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

Diámetro de tubería:

$$1.27 \text{ cm} = 0.0127 \text{ m}$$

Velocidad:

$$v = 2.28 \text{ m/s}$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD}{\nu}$$

$$N_R = (2.28 \text{ m/s})(0.0127 \text{ m}) / 0.893E-6 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N_R = 32,426$$

Dado que $N_R > 4000$ el flujo es turbulento.

8.2 Determinación del factor de fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Datos:

D=0.0127 m

$\varepsilon=3.0E-7$ m Tubo plástico

$N_R=32426$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(0.0127/3E-7)} + \frac{5.74}{32426^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{[\log(6.38E-6 + 500.16E-6)]^2}$$
$$f = 0.023$$

8.3 Determinación de pérdidas

Aplicando la ecuación de Darcy:

$$hf = k \frac{v^2}{2g}$$

hf = Pérdida por fricción

$$hf = hf_{\text{tubería}}$$

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0.023 \frac{0.225m}{0.0127m} \frac{(2.28m/s)^2}{2(9.81m/s)}$$

$$hf = 0.1079m$$

$$hf = 10.79cm$$

Tabla XXXI. **Tabla de comparación teórica y práctica de pérdidas**

Tramo	Hf teórica (cm)	Hf práctico (cm)
1	10.79	5
2	10.79	3
3	10.79	5
4	10.79	4

8.4 Comparación f teórico y práctico

Factor de fricción teórico

$$f=0.023$$

Factor de fricción práctico

$$f = k \frac{D}{L}$$

$$k = \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{4}$$

$$k = \frac{0.189 + 0.113 + 0.189 + 0.151}{4}$$

$$k = 0.1605$$

D=1.27 cm

L=22.5 cm

$$f = 0.1605 \frac{1.27}{22.5}$$

$$f = 0.009$$

2.6 Análisis de resultados

La medición de los caudales en ambos sistemas marca gran diferencia, en el caso del sistema por bombeo sobrepasa más del 60% de la magnitud del caudal obtenido en el sistema por gravedad, por lo que se hace necesario conocer la importancia y relevancia que tienen la utilización de válvulas en sistemas de abastecimiento para el control de carga de presión, dirección y manejo de caudal.

Teniendo diferencia de caudales en ambos sistemas está implícita la variación de las cargas piezométricas y carga de velocidad, siendo la carga de velocidad la misma en toda la trayectoria del sistema debido a que no existe diferencia en el diámetro de las tuberías y de los accesorios.

La determinación de la constante de pérdida k para cada tramo incluye la pérdida provocada por la misma tubería, así como el conjunto de accesorios que hay en los mismos por lo que se observa relativa diferencia de pérdida de energía en comparación teórica y práctica.

El comportamiento de la carga total en un sistema de conducción es similar en la mayoría de los casos, iniciando con una carga total alta que disminuye paulatinamente conforme los accesorios y la pérdida por fricción que presenta la propia tubería.

La línea de carga total y la línea de carga piezométrica son paralelas, debido a que la carga de velocidad es la misma en todo el sistema.

La constante de pérdida k por tramo significa una constante de proporcionalidad de valor experimental entre las pérdidas de energía debido a las de fricción y localizadas que existen en cada tramo y la carga de velocidad promedio que existe en éste.

La determinación de la constante de pérdida K en un ensayo por fricción de una tubería de igual sección debe ser similar cuando las tomas piezométricas se encuentran a la misma distancia, debido a que el factor de fricción de una tubería es el mismo. Las pérdidas por fricción provocada en los ensayos anteriores están bajo las condiciones de flujo turbulento, dependiendo el factor de fricción del número de Reynolds y de la rugosidad de la tubería.

3. INSTRUCTIVO DE ENSAYO

3.1 Instructivo de pérdidas localizadas

- 1) Definir el sistema a operar por medio de válvulas: sistema por gravedad o sistema por bombeo.

Figura 30. Válvula de definición de sistema



- 2) Determinar el caudal de circulación del sistema de forma volumétrica. Se aconseja determinar 5 tomas de tiempos para tener un mejor resultado.
- 3) Calcular la velocidad en la tubería por medio de la ecuación de continuidad, donde $Q=V/A$.
- 4) Realizar las tomas de alturas piezométricas proporcionadas por los tubos piezométricos.
- 5) Determinar la pérdida de energía experimental en cada tramo, por medio de la resta algebraica de las alturas piezométricas.

- 6) Determinar el factor de pérdida experimental de cada tramo a partir de la ecuación $hf = kv^2/2g$
- 7) Trazar la línea de carga piezométrica del sistema, ploteando los puntos de estudio.
- 8) Trazar la línea de carga total del sistema, ploteando los puntos de estudio.

9) Determinar el tipo de flujo de acuerdo a la ecuación $N_R = \frac{vD}{\nu}$

10) Determinar el factor de fricción de la tubería de acuerdo a la ecuación

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

- 11) Determinar la pérdida de energía localizadas teóricas en cada tramo de acuerdo a los factores de fricción que presentan los libros de texto.
- 12) Realizar una comparación de la pérdida de las pérdidas teóricas y prácticas de los factores de fricción en forma teórica y práctica.

3.2 Instructivo de pérdidas por fricción

- 1) Definir el sistema a operar por medio de válvulas: sistema por gravedad o sistema por bombeo.

Figura 31. Válvula de definición de sistema



- 2) Determinar el caudal de circulación del sistema de forma volumétrica. Se aconseja determinar 5 tomas de tiempos para tener un mejor resultado.
- 3) Calcular la velocidad en la tubería por medio de la ecuación de continuidad, donde $Q=V/A$.
- 4) Realizar las tomas de alturas piezométricas proporcionadas por los tubos piezométricos.
- 5) Determinar la pérdida de energía experimental en cada tramo, por medio de la resta algebraica de las alturas piezométricas.
- 6) Determinar el factor de pérdida experimental de cada tramo a partir de la ecuación $h_f=kv^2/2g$
- 7) Trazar la línea de carga piezométrica del sistema, ploteando los puntos de estudio.
- 8) Trazar la línea de carga total del sistema, ploteando los puntos de estudio.

9) Determinar el tipo de flujo de acuerdo a la ecuación $N_R = \frac{\nu D}{v}$

10) Determinar el factor de fricción de la tubería de acuerdo a la ecuación

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

11) Realizar una comparación de la pérdida de las pérdidas teóricas y prácticas de los factores de fricción en forma teórica y práctica.

12) Determinar el factor de fricción práctico a partir de la ecuación $f = k \frac{D}{L}$

CONCLUSIONES

1. La pérdida de energía por fricción en una tubería depende de la rugosidad relativa de la misma, del tipo de flujo que existe, del diámetro de la tubería, longitud y de la velocidad.
2. El sistema de conducción por bombeo puede presentar igual o mayor caudal comparado con el sistema por gravedad, con la diferencia que el sistema de bombeo presenta mayores cargas de presión a lo largo del circuito.
3. El comportamiento o la tendencia de la línea de carga total y la línea de carga piezométrica en el sistema de conducción es similar, debido a que la tubería es del mismo diámetro en todo el circuito por lo que la carga de velocidad es la misma.
4. La pérdida de energía en cada tramo se resume como el producto del factor de pérdida multiplicado por la carga de velocidad.
5. La variación de carga piezométrica y carga total es lineal en los diferentes puntos de una tubería del mismo diámetro.
6. La constante de pérdida en los tramos 1 y 2 depende significativamente de la cantidad y tipo de accesorios que existen, por lo que dicha constante representa la pérdida localizada total.

7. El cálculo de la pérdida por fricción en tuberías permite conocer el comportamiento de la carga total y la carga piezométrica en sistemas de conducción con el objetivo de proporcionar un buen diseño de los mismos.

RECOMENDACIONES

1. Para el análisis de un sistema de abastecimiento de agua potable, tanto en bombeo como en gravedad, se sugiere conocer todas las pérdidas de energía, incluyendo las pérdidas por fricción y la pérdida provocada por los accesorios, para conocer la carga total del sistema y así evitar las sobrepresiones en las tuberías.
2. Es importante hacer un estudio más profundo acerca de las ecuaciones presentadas para determinar la pérdida de energía, ya que todas éstas tienen sus ventajas y limitaciones, que probablemente en algún momento será útil.
3. Cuando se necesita disminuir la carga de presión provocada por una bomba muy potente o por un sistema de gravedad muy complejo, se puede utilizar válvulas de globo, con el objetivo de provocar gran pérdida en ese punto, por lo que la carga piezométrica disminuye considerablemente.
4. El mantenimiento en todo sistema de abastecimiento es de suma importancia, por lo que se recomienda mantener las tuberías en buen estado, las uniones de los accesorios y tuberías revisarlas cada cierto tiempo para mantener una vida útil prolongada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Coutinho de Lencastre, Armando. **Manual de Ingeniería Hidráulica**. 4a. ed. Universidad Pública de Navarra, España, 1998.
2. Giles, Ranald V. **Mecánica de los fluidos e hidráulica**. 2da. edición. Editorial McGraw-Hill, México, 2000.
3. J. M. Acevedo y Guillermo Acosta A. **Manual de Hidráulica**. Editorial Harla, México, 1976.
4. Mot, Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. 6ta. edición. Editorial Prentice Hall, México, 2006.
5. Ordóñez, Juan. **Cruz roja guatemalteca, unidad técnica agua y saneamiento, modulo educativo, operación y mantenimiento de sistemas de agua**, Guatemala 2006.
6. Streeter, Víctor L. **Mecánica de los fluidos**. 9a edición. Editorial McGraw-Hill, México, 2000.
7. **Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable, organización panamericana de la salud**, Lima 2005.