



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

ELABORACION DE UN PROTOCOLO
EXPERIMENTAL DE FLUJO DE FLUIDOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
CERRATO FLORES JESÚS ARMANDO

Director de Tesis: I.Q. Dominga Ortiz Bautista

Noviembre 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/019/10

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CERRATO FLORES JESÚS ARMANDO
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I. Q. José Bermúdez Mosqueda
VOCAL	I. Q. Dominga Ortiz Bautista
SECRETARIO	Dr. Esteban Minor Pérez
SUPLENTE	M. en I. María Estela de la Torre Gómez Tagle
SUPLENTE	M. en C. Javier Hernández Aguilar

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

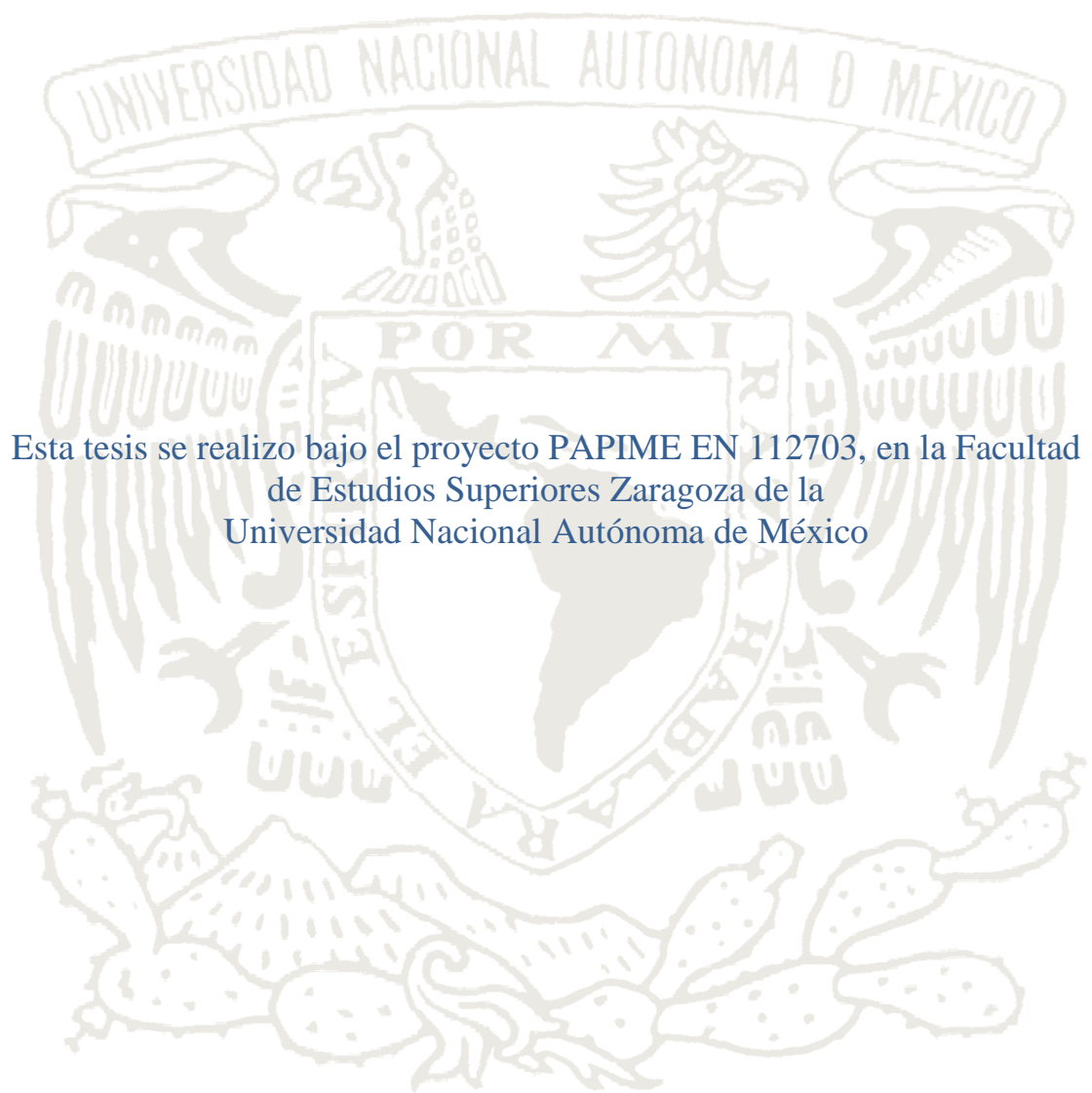
A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

México D. F., a 25 de Agosto de 2010

JEFA DE LA CARRERA

I. Q. ZULA GENNY SANDOVAL VILLANUEVA

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
INGENIERIA QUIMICA
SECRETARIA TECNICA



Esta tesis se realizo bajo el proyecto PAPIME EN 112703, en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México

AGRADECIMIENTOS

Gracias Satur y Chuy que siempre se procuraron por darme todo lo que estuviera en sus manos para salir adelante, por apoyarme durante toda mi vida, por confiar en mí y por ser mis papás.

A Shrek que aunque él no se haya dado cuenta y yo nunca lo demostré, siempre fue un ejemplo de lo que debía y no debía hacer para seguir adelante.

A los peques (Youssarian y Valentina), que aunque son apenas unos bebés ya he aprendido mucho de ellos y espero ellos aprendan de mí.

A toda mi familia en especial a mis primos (Gaby, Gordo, Chito, Chel y Jando). Y a mi abuelita Aurelia quien siempre estará cuidando de esta familia tan maravillosa con que cuento.

A los maestros de la FES (Antonio Zamora, Crescenciano, Catalina Machuca, Matsubara Oda, Miriam Muños, Gloria Peralta) que además de ser buenos maestros son también unas excelentes personas, que con un consejo o alguna llamada de atención me han ayudado a ser un profesionista, pero que me han ayudado aun mas a ser un mejor ser humano.

Muchas gracias a la profesora Dominga ya que sin su apoyo, estímulo, comprensión y paciencia este proyecto ni siquiera se hubiera iniciado. Gracias por darme la oportunidad de realizar la tesis bajo su dirección y su buena vibra. Gracias “Ma’ Minga”. Y gracias a Javier Hernández, que con sus correcciones ha aportado gran contenido a este trabajo.

A mis compañeros y amigos de la Facultad. (Rita, Liz, Xitlali, Klarize, Magy, Karen, Kary, Amparo, Mónica, Tere, Yasmin, Yas, Esperanza, Ángeles, Anabel, Sonia, Q’sos, Pika, Guayaba, Champi, Loo’r’s, Campanita, Ratrix, Longaniza, Topo, Cuco, Pingüino, etc.). De cada uno me llevo gratos recuerdos, frases inmemorables, ideas brillantes y absurdas, sus risas y sus llantos, su locura y de algunos su ternura, y sobre todo su incomparable compañía.

En especial a mis carnales Hugo (Pusy) e Israel (Wampyz) que siempre y desde el primer semestre de la carrera en cualquier momento y circunstancia conté con su apoyo, sus ocurrencias y sus consejos. ¡Gracias gordos!

También a todos los grandes amigos (Naranjo, Pepa, Coco, Rafa, Carlitos, Pipiolo, Clon, Chivis y el Leobas) que comparten el amor y la pasión por la música, la cual siempre ha sido y será la que libere y motive mi vida.

Mil gracias a ti, por apoyarme e impulsarme día a día, para poder continuar y culminar con este proyecto del que también eres parte. Siempre estarás presente, siempre serás mi orgullo y mi inspiración. Gracias por dejar momentos inolvidables, llenos de magia, alegría y felicidad... 3i3i.

En general gracias a todos los que de una forma u otra fueron parte de esto que es para mí, el primer sueño cumplido en mi vida.

Por mi raza hablara mi espíritu. UNAM.

ÍNDICE

Nomenclatura	viii
Resumen	x
Introducción	xii
Objetivos	xiv

CAPÍTULO I – GENERALIDADES

I.1.- Mecánica de fluidos	2
I.2.- Dinámica y cinemática	2
I.3.- Fluido	3
I.3.1.- Clasificación de los fluidos	3
I.4.- Propiedades de los fluidos	3
I.4.1.- Temperatura	3
I.4.2.- Presión	3
I.4.3.- Masa y peso	5
I.4.4.- Densidad	5
I.4.5.- Peso específico	5
I.4.6.- Volumen específico	6
I.4.7.- Viscosidad	6
I.4.8.- Compresibilidad, elasticidad	7
I.4.9.- Presión de vapor y punto de ebullición	8
I.4.10.- Tensión superficial y capilaridad	9
I.5.- Características de flujo en tuberías	10
I.5.1.- Caudal volumétrico	10
I.5.2.- Velocidad de flujo	10
I.5.3.- Caudal másico	11
I.5.4.- Experimento de Reynolds	11
I.5.5.- Flujo laminar, turbulento y zona crítica	11
I.6.- Análisis dimensional	12
I.6.1.- Parámetros adimensionales importantes de flujo de fluidos	13
I.6.2.- Teorema π	14
I.7.- Manómetros	17
I.7.1.- Clasificación de manómetros	17
I.7.2.- Tipos de manómetros	17

I.8.- Medidores de flujo	18
I.8.1.- Factores para la elección de medidores de flujo	18
I.8.2.- Tipos de medidores de flujo	19
CAPITULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
II.1.- Volumen de control	21
II.2.- Volumen material	21
II.3.- Ecuación de conservación de masa	22
II.4.- Ecuación de conservación de energía	22
II.4.1.- Aplicación del teorema de Bernoulli	24
II.4.2.- Restricciones de la ecuación de Bernoulli	25
II.5.- Ecuación de cantidad de movimiento	25
II.6.-Conceptos fundamentales del área de flujo	26
II.6.1.-Efecto de la rugosidad	26
II.6.2.-Numero de Reynolds.	27
II.6.3.-Efecto del factor de fricción	28
II.7.-Ecuaciones para el cálculo de f	28
II.7.1.-Fórmula de Hagen–Poiseuille	28
II.7.2.-Fórmula de Blasius	28
II.7.3.-Fórmula de Prandtl y Von–Karman	28
II.7.4.-Fórmula de Nikuradse	28
II.7.5.-Fórmula de Darcy–Weisbach	29
II.8.- Pérdidas generadas en el sistema	31
II.8.1.- Pérdidas lineales (h_{pl})	31
II.8.2.- Pérdidas singulares (h_{ps})	31
II.8.3.- Métodos para calcular las pérdidas por fricción totales (H_{ft})	32
II.9.-Diagrama de Moody	33
CAPITULO III – DISEÑO EXPERIMENTAL	
III.1.-Diseño factorial 2^K	35
III.2.- Clasificación de variables	41

CAPITULO IV – RESULTADOS

IV.1.- Registro de datos experimentales de ΔP y f en tubería de 1/2”	44
IV.1.1.- Grafico ΔP & Q para tubería de 1/2”	45
IV.1.2.- Diagrama de Moody para tubería de 1/2”	46
IV.2.- Registro de datos experimentales de ΔP y f en tubería de 3/4”	47
IV.2.1.- Grafico ΔP & Q para tubería de 3/4”	48
IV.2.2.- Diagrama de Moody para tubería de 3/4”	49
IV.3.- Registro de datos experimentales de ΔP y f en tubería de 1”	50
IV.3.1.- Grafico ΔP & Q para tubería de 1”	51
IV.3.2.- Diagrama de Moody para tubería de 1”	52
IV.4.- Registro de datos experimentales de ΔP y f en tubería de 1 1/4”	53
IV.4.1.- Grafico ΔP & Q para tubería de 1 1/4”	54
IV.4.2.- Diagrama de Moody para tubería de 1 1/4”	55
IV.5.- Registro de datos experimentales de ΔP y f en tubería de 1 1/2”	56
IV.5.1.- Grafico ΔP & Q para tubería de 1 1/2”	57
IV.5.2.- Diagrama de Moody para tubería de 1 1/2”	58
IV.6.- Diagrama de Moody (datos experimentales)	59
IV.7.- Análisis de resultados	60
CAPITULO V – PROPUESTA DE PROTOCOLO EXPERIMENTAL	
V.- Propuesta de protocolo experimental	62
CONCLUSIONES	76
Recomendaciones para futuras investigaciones	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXO A	
ANEXO A-1 Factores de conversión	83
ANEXO A-2 Propiedades físicas del agua y mercurio	85
ANEXO A-3 Rugosidad absoluta	87

ANEXO A-4 Rugosidad relativa	88
ANEXO A-5 Valores de α para la formula de Genijew	89
ANEXO A-6 Valores del coeficiente K en pérdidas singulares	90
ANEXO A-7 Nomograma del coeficiente de resistencia K	91
ANEXO A-8 Diagrama de Moody	92
ANEXO A-9 Diagrama del equipo de tuberías lisas de PVC	93
ANEXO A-10 Diámetros de tubería de PVC	94
ANEXO B	
ANEXO B-1 Calibración de Rotámetros	95
ANEXO C	
ANEXO C-1 Memoria de cálculo	98

NOMENCLATURA

Símbolo	Magnitud	Unidades SI
<i>A</i>	Área	m^2
<i>D</i>	Diámetro	m
<i>De</i>	Diámetro equivalente	m
<i>E</i>	Energía	J
<i>Ek</i>	Energía cinética	J
<i>Ep</i>	Energía potencial	J
<i>F</i>	Fuerza	N
<i>f</i>	Factor de fricción	Adimensional
<i>f</i>	Frecuencia	Hz
<i>g</i>	Aceleración	$m\ s^{-2}$
<i>gc</i>	Gravitacional cte.	$Kg \cdot m \cdot Kg^{-1} \cdot s^{-2}$
<i>h</i>	Altura	m
<i>h_{pl}</i>	Pérdida de carga lineal	$Kg^{\rightarrow} \cdot m \cdot Kg^{-1}$
<i>h_{ps}</i>	Pérdida de carga singular	$Kg^{\rightarrow} \cdot m \cdot Kg^{-1}$
<i>Hft</i>	Pérdida de carga totales	$Kg^{\rightarrow} \cdot m \cdot Kg^{-1}$
<i>I</i>	Momento de inercia	$Kg \cdot m^2$
<i>K</i>	Coefficiente de perdidas	Adimensional
<i>K</i>	Modulo de elasticidad volumétrica	$m^2 \cdot Kg^{-1}$
<i>L</i>	Momento angular	$Kg \cdot m^2 \cdot s^{-1} \cdot rad$
<i>L</i>	Longitud	m
<i>LT</i>	Longitud equivalente total	m
<i>Leq</i>	Longitud equivalente	m
<i>Ltr</i>	Longitud de tramo recto	m
<i>M</i>	Momento de una fuerza	N·m
<i>m</i>	Masa	Kg
<i>P</i>	Presión	Pa
<i>Pv</i>	Presión de vapor	Pa
<i>p</i>	Momento lineal	$Kg \cdot m \cdot s^{-1}$
<i>p</i>	Potencia	W
<i>Q</i>	Calor	J
<i>Q</i>	Caudal volumétrico	$m^3 \cdot s^{-1}$
<i>Re</i>	Numero de Reynolds	Adimensional
<i>r</i>	Radio	m
<i>s</i>	Longitud de arco	m
<i>t</i>	Tiempo	s
<i>U</i>	Energía interna	J
<i>u</i>	Velocidad promedio de fluido	$m \cdot s^{-1}$
<i>V</i>	Volumen	m^3
<i>v</i>	Volumen especifico	$m^3 \cdot Kg^{-1}$
<i>W</i>	Trabajo	J
<i>W</i>	Peso	$Kg \cdot m \cdot s^{-2}$
<i>w</i>	Caudal másico	$Kg \cdot s^{-1}$
<i>x</i>	Posición	m
<i>z</i>	Altura (ecuación de Bernoulli)	m

Símbolo	Magnitud	Unidades SI
α	Aceleración angular	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
β	Coefficiente de compresibilidad	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$
ε	Rugosidad	m
γ	Peso específico	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
γ_{H_2O}	Peso específico del agua	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
μ	Viscosidad Dinámica	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
ν	Viscosidad Cinemática	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
π	Pi (=3.1416)	Adimensional
θ	Ángulo plano	rad
ρ	Densidad	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ'	Densidad referencia	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_r	Densidad relativa	Adimensional
τ	Tensión de corte	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
ω	Velocidad angular	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
ω	Frecuencia angular (=2 πf)	s^{-1} , rad s^{-1}
ξ	Coefficiente de pérdidas singulares	Adimensional

RESUMEN

Dentro del siguiente trabajo de tesis se expone la elaboración de una propuesta de práctica experimental en el área de mecánica de fluidos. La practica propuesta es “Análisis de un sistema de tuberías lisas”.

Como parte fundamental del área de estudio (mecánica de fluidos), es de primordial importancia poder contar con los conceptos básicos para llegar a tener una mejor comprensión del tema, por lo cual se integra dentro de este trabajo las propiedades de los fluidos más relevantes, como lo es la viscosidad y la densidad entre otras, y los principales conceptos para su comprensión. De igual manera se hace mención al método de análisis dimensional “Pi”. Y la descripción de los accesorios que integran el equipó de tuberías lisas de PVC, como lo son: manómetros en U y rotámetros.

De igual manera se hace mención de las tres leyes fundamentales que rigen el comportamiento del flujo de fluidos: La ley de conservación de masa, ley de conservación de energía y la ley de cantidad de movimiento, que en conjunto forman la base teórica de la mecánica de fluidos.

Ya que el titulo de la práctica propuesta es “Análisis de un sistema de tuberías lisas” se introdujo el tema de factor de fricción. En este mismo capítulo se reportan la mayoría de las formulas de factor de fricción útiles para los diferentes flujos y diferentes diámetros de tuberías. Así como de métodos para la obtención de las pérdidas por fricción en tuberías lisas.

Para poder desarrollar el protocolo experimental se recurrió a realizar un diseño experimental factorial 2^K que nos permitiera determinar las variables implicadas en el fenómeno en estudio. Además de que nos permite acotar los parámetros que se involucran en el sistema, haciendo así más sintetizado el procedimiento experimental.

Los resultados experimentales de la caída de presión a diferentes longitudes, diámetro y flujos de operación se pueden observar dentro del capítulo IV. También se muestra el tratamiento que se le realiza a los datos, desde las formulas empleadas y el análisis de los resultados obtenidos.

En la parte medular del trabajo de tesis se encuentra plasmado el protocolo experimental propuesto para la utilización del equipó de tubería lisas de PVC, y por consiguiente la aplicación de la practica experimental de flujo de fluidos para el sexto semestre de la carrera de Ingeniería Química.

Dicho protocolo se encuentra reportado como se presentan en la actualidad las prácticas de la materia de LTP de 6° semestre de la carrera de Ingeniería Química de la FES Zaragoza.

Y por último se anexan tres apartados: El primero se encuentran plasmados factores de conversión, algunas propiedades del agua y mercurio, tablas de rugosidad (absoluta y relativa), valores del coeficiente K , tablas de L/D y el diagrama de Moody. En el segundo anexo se describe de forma específica procedimiento de calibración que se les realizó a los rotámetros. Y por último en el tercer apartado se muestra la memoria de cálculo empleada en la obtención de los resultados (ecuaciones y factores de conversión empleados).

INTRODUCCION

Es evidente que la Mecánica de Fluidos tiene una gran importancia y diversas aplicaciones en muchos campos de la vida cotidiana, desde aplicaciones sofisticadas como lo es en la Ingeniería Química, la Oceanografía, la Ingeniería Naval, la Aeronáutica, el Diseño Industrial, la Ingeniería Civil entre otras, hasta lo más básico como lo puede ser el simple hecho de regar un jardín, encender la estufa o abrir la llave de la regadera.

Es por esto, que el alumno debe involucrarse con las distintas actividades que realiza un Ingeniero Químico en el manejo de los fluidos en tuberías, equipo de bombeo, etc. Ya que en cualquier campo en el que se quiera desenvolver va encontrarse con problemas relacionados con la Mecánica de Fluidos.

Dentro de las instalaciones de la planta piloto de la FES Zaragoza se cuenta con un equipo de tuberías lisas de PVC el cual fue diseñado con el objeto de permitir realizar la práctica “Análisis de un sistema de tuberías lisas”. Se ha propuesto realizar un protocolo de experimentación para el nuevo equipo de flujo de fluidos. Dicho equipo fue construido con el apoyo del programa “Elaborar procedimientos de trabajo de Ingeniería Química del programa PAPIME EN119903” en Julio del 2008.

El protocolo propuesto nos ayudara a analizar las caídas de presión y las pérdidas por fricción de forma experimental a diferentes longitudes y diferentes diámetros, además de poder familiarizarse con los accesorios: medidores de flujo y manómetro que integran el equipo.

Esta propuesta se realiza con el fin de cumplir la necesidad con que cuenta la materia de Laboratorio de Taller de Proyectos de 6° semestre de la carrera de Ingeniería Química de la FES Zaragoza en requerir de un protocolo de experimentación que nos permita operar el equipo de tuberías lisas de PVC.

Además de que se ha podido observar que dentro de la carrera de Ingeniería Química, impartida en FES Zaragoza, no existe ninguna materia que además de poder enseñar el contenido teórico de la asignatura, también pueda llevar de la mano actividades experimentales que ayuden al alumno a una mayor comprensión de lo aprendido dentro de las aulas.

Esto permitirá que el alumno cuente con un mejor nivel académico y una mayor experiencia con la operación de los equipos que se encuentran en la planta piloto. Sin dejar atrás que se debe fomentar una mayor inquietud por los fenómenos que rodean la Mecánica de Fluidos y todas las demás materias.

Es importante señalar que el programa de estudios de la carrera de Ingeniería Química cuenta con el Laboratorio y Taller de Proyectos en donde se aplican los conocimientos de la mecánica de fluidos y si estos conocimientos llegasen a ser comprendidos de una forma clara y precisa se resolverían mejor los problemas tanto de comprensión, como de cálculo generados en los proyectos realizados durante la carrera.

Es por todo esto que a continuación se plantean los objetivos con que cuenta dicho trabajo de tesis:

OBJETIVOS

GENERALES

- * Elaboración de un protocolo de experimentación que sea útil para el equipo de flujo de fluidos de tuberías lisas (PVC), del Laboratorio de Taller de Proyectos de 6º semestre de la carrera de Ingeniería Química de la FES Zaragoza. Dicho protocolo nos permite determinar las caídas de presión a diferentes longitudes, comparar las caídas de presión resultantes a diferentes diámetros y flujos.

PARTICULARES

- * Desarrollar los conocimientos básicos y habilidades necesarias en la Mecánica de Fluidos que permita a los alumnos una buena comprensión y desarrollo de los problemas que deriven en el ejercicio de la profesión.
- * Mostrar el comportamiento de un fluido en una tubería recta y sus accesorios.

CAPITULO I

GENERALIDADES

I. GENERALIDADES

I.1.-Mecánica de fluidos

Es la ciencia especializada en el estudio del comportamiento de los fluidos en reposo y en movimiento; es decir la acción de fuerzas sobre un fluido en equilibrio hidrostático o en movimiento hidrodinámico.

I.2.-Dinámica y cinemática

La dinámica describe la evolución en el tiempo de un sistema físico en relación a las causas que provocan los cambios de estado físico y/o estado de movimiento. El objetivo de la dinámica es describir los factores capaces de producir alteraciones de un sistema físico, cuantificarlos y plantear ecuaciones de movimiento o ecuaciones de evolución para dicho sistema.

MAGNITUD FÍSICA
Masa
Fuerza
Momento de inercia
Momento angular
Energía
Energía potencial
Energía cinética
Trabajo
Potencia
Densidad (masa)
Presión

Tabla I.1 Magnitudes físicas regidas por la Dinámica

La cinemática estudia las leyes del movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las causas que lo provoquen, limitándose así, al estudio de la trayectoria en función del tiempo. En la cinemática se utiliza un sistema de coordenadas para describir las trayectorias y se le llama sistema de referencia.

MAGNITUD FÍSICA
Tiempo
Posición
Velocidad
Aceleración
Velocidad angular
Radio
Área
Volumen
Frecuencia

Tabla I.2 Magnitudes físicas regidas por la Cinemática

I.3.-Fluido

Los fluidos son sustancias capaces de fluir que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma.

Un fluido pueden ser líquido y gas. Un líquido están sometido por fuerzas intermoleculares que lo mantienen con un volumen definido, pero su forma es igual al recipiente que lo contiene. Por otro lado un gas llenará el recipiente que lo contenga ejerciendo una presión uniforme sobre todas las paredes del recipiente. Ambos fluidos son compresibles pero los gases en mayor medida que los líquidos.

I.4.-Propiedades de los fluidos

Es de indispensable interés conocer las propiedades de los fluidos y saber su importancia respectiva que desempeñan en los procesos que los integren. Ya que con variaciones de presión y temperatura en el sistema todas las propiedades del fluido podría modificarse considerablemente hasta llegar a causar variaciones en los procesos.

I.4.1.-Temperatura

Magnitud escalar relacionada con la energía interna, de un sistema termodinámico. Dicha propiedad depende exclusivamente de la cantidad de movimiento que generan las moléculas que componen la sustancia, ya sea en un sentido de traslación, rotación, o en forma de vibraciones. El cambio en la temperatura ya sea mayor o menor afecta directamente a la densidad, viscosidad y compresibilidad.

I.4.2.-Presión

La presión es definida como “la cantidad de fuerza (F) por una unidad especificada de área (A).

$$P = \frac{F}{A}$$

La presión de un fluido se transmite con igual intensidad en todas direcciones y actúa normalmente a cualquier superficie plana.

I.4.2.1.-Presión atmosférica

Presión que ejerce la atmosfera que rodea la tierra sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella. La presión atmosférica varía con respecto a la altura sobre el nivel del mar, es decir; a mayor altura la presión atmosférica será menor siendo, $14.7 \text{ lb}^{\rightarrow}/\text{in}^2$ la presión atmosférica más alta.

I.4.2.2.-Presión manométrica

Es la presión de un fluido medida con respecto a la presión atmosférica fuera de su contenedor, son normalmente las presiones superiores a la atmosférica.

$$P_{\text{manométrica}} = P_{\text{absoluta}} - P_{\text{atmosférica}}$$

I.4.2.3.-Presión manométrica negativa o de vacío

Se refiere a las presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, esto es, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente.

De la misma manera que para las presiones manométricas positivas, las variaciones de la presión atmosférica tienen solo un efecto pequeño en las lecturas del indicador de vacío.

I.4.2.4.-Presión absoluta

Se mide con respecto al cero absoluto o perfecto vacío. La presión absoluta es cero cuando no existe choques entre las moléculas, lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña.

$$P_{absoluta} = P_{manométrica} + P_{atmosférica}$$

I.4.2.5.-Presión diferencial

Es la diferencia entre dos presiones. (La presión manométrica es actualmente una presión diferencial entre la presión del fluido y la presión atmosférica).

I.4.2.6.-Presión de estancamiento

Es la presión que se produce como consecuencia de reducir súbitamente la velocidad de un fluido en una tubería, ya sea mediante el cierre brusco de una válvula. Al reducirse la velocidad el fluido se comprime, incrementándose la presión, la energía cinética se transforma en presión, y se genera una presión, en ocasiones produciendo un ruido, también conocido como golpe de ariete.

I.4.2.8.-Presión de dinámica

Cuando los fluidos se mueven en un conducto, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la presión conocida como dinámica. La presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido.

I.4.2.9.-Presión hidrostática

Es aquella fuerza perpendicular ejercida a las paredes del recipiente o a la superficie del objeto sumergido sin importar la orientación que adopten las caras. Si el líquido fluyera, las fuerzas resultantes de las presiones ya no serían necesariamente perpendiculares a las superficies. Esta presión depende de la densidad del líquido en cuestión y de la altura a la que esté sumergido el cuerpo.

En el mismo plano horizontal, el valor de la presión de un líquido es igual en cualquier punto. Cuando se realizan cálculos que impliquen a la presión de un fluido, se debe hacer la medición en relación a una referencia. Normalmente, la presión de referencia es la atmosférica.

$$P = \rho \left(\frac{g}{g_c} \right) h$$

● *En el sistema absoluto de unidades*

La diferencia de presión entre dos puntos A y B dentro del mismo fluido viene dada por la expresión:

$$P_A - P_B = \rho \left(\frac{g}{g_c} \right) h_A - h_B = \rho \left(\frac{g}{g_c} \right) \Delta h$$

I.4.3.-Masa y peso

La masa es la propiedad de un fluido que se mide por su inercia o resistencia a un cambio de movimiento, también es una medida de la cantidad de fluido (m).

Es la fuerza con que el cuerpo es atraído hacia la tierra por la atracción de la gravedad se le nombra peso (W).

Ya que el peso está relacionado con la masa y con la aceleración debida a la gravedad.

$$W = m \cdot g$$

El valor de la aceleración gravitacional $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$

El valor de la constante gravitacional $g_c = 1 \frac{Kg \cdot m}{N \cdot s^2}$

I.4.4.-Densidad

La densidad de un fluido afecta su flujo de dos maneras distintas. En primera instancia la densidad determina la inercia de un volumen unitario del fluido y, por lo tanto, su aceleración cuando dicho volumen se somete a una fuerza dada.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Densidad relativa: La densidad relativa de una sustancia ρ_r es el cociente entre su densidad ρ y la densidad de otra sustancia ρ' , tomada como referencia y denominada patrón, es decir:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho'}$$

Siendo esta una cantidad adimensional. Para sustancias líquidas se suele tomar como sustancia patrón el agua a $4^\circ C$. Para los gases, la sustancia de referencia la constituye con frecuencia el aire que a la temperatura de $0^\circ C$ y presión de 1 atmosfera.

I.4.5.-Peso específico

Es la relación entre peso y volumen, es decir; es el peso de la unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \ g/g_c}{V} \qquad \gamma = \rho \frac{g}{g_c}$$

1.4.6.-Volumen específico

Es el volumen de una sustancia por unidad de masa.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

1.4.7.-Viscosidad

La viscosidad de un fluido, es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes o a la deformación de corte (resistencia al fluir). La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

En la figura I.1 ambos planos de fluidos de área “ A_1 ” y “ A_2 ” se encuentran separados por una distancia dy y se mueven en una misma dirección y a velocidades diferentes u_1 y u_2 . Donde u_2 es cero y por lo tanto la velocidad de la capa de fluido en contacto con la placa inferior es cero y la velocidad de la capa en contacto con la placa superior es u_1 .

Newton supuso que la fuerza necesaria para mantener estas diferencias de velocidad era proporcional a la diferencia de velocidades a través del líquido o gradiente de velocidad.

$$F \propto \frac{du}{dy}$$

El gradiente de velocidad du/dy es una medida de velocidad con la que se mueve una capa de fluido con respecto a otra; además de que describe el corte que experimenta el líquido y puede llamarse velocidad de corte S .

$$S = \frac{du}{dy}$$

El esfuerzo cortante o tensión de corte (τ) está dado como la fuerza por unidad de área requerida para producir un corte.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

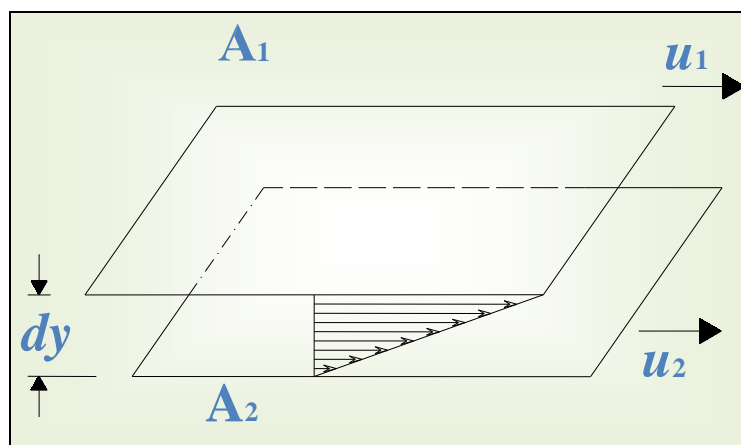


Fig. I.1 Modelo de Newton para definir la viscosidad

Una alta viscosidad del fluido trae como consecuencia:

- Una alta resistencia al flujo, lo cual nos lleva a tener una lenta operación
- Incrementa el consumo de potencia debido a sus altas pérdidas por fricción
- Incrementa la caída de presión a través de válvulas y accesorios en general
- Una alta temperatura a consecuencia por la fricción generada

Y si la viscosidad es baja ocasiona:

- Pérdidas por goteo
- Desgaste excesivo debido al rompimiento de la película de aceite entre las partes en movimiento. Estas partes pueden ser los componentes internos de una bomba o de una válvula.

I.4.7.1.-Viscosidad dinámica

Cuando un fluido se mueve, se desarrolla en él una tensión de corte, cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido.

La tensión de corte se define como la fuerza requerida para obligar a una capa del fluido a deslizar sobre otra capa de la misma sustancia.

La viscosidad dinámica es función principalmente de la temperatura y presión. La presión es prácticamente despreciable, en tanto que con el aumento de la temperatura la viscosidad de los líquidos disminuye.

En fluidos líquido, encontramos que la magnitud de la tensión de corte es directamente proporcional al cambio de la velocidad entre diferentes posiciones del fluido. El hecho de que la tensión de corte del fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad puede establecerse matemáticamente como:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

I.4.7.2.-Viscosidad cinemática

Para cálculos en mecánica de fluidos es más conveniente relacionar a la viscosidad dinámica del fluido con su densidad. La viscosidad cinemática se define como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

I.4.8.-Compresibilidad, elasticidad

La compresibilidad de un fluido, es la medida de cambio de volumen cuando el flujo está sometido a presiones o tensiones normales, en ambos casos se da el almacenaje de energía elástica. Suponiendo conversiones de energía perfectas, los volúmenes de fluidos comprimidos se expandieran volviendo a sus volúmenes originales una vez que haya cesado la presión aplicada sobre ellos.

Sobre los líquidos el efecto de la presión es muy pequeño, se desprecia y se puede considerar incompresible para facilitar los cálculos en la medición de fluido líquido por ejemplo, en el caso del agua sería necesario un esfuerzo de $1,000 \text{Kg/cm}^2$ para obtener una reducción en volumen de 5% aproximadamente, sin embargo la compresibilidad de los líquidos es muy importante ya que ocasiona fenómenos como golpes en tuberías (golpe de ariete).

El coeficiente de compresibilidad describe la variación del volumen que ocupa una determinada cantidad de fluido al aplicarle presión a una temperatura dada.

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial P} \right]_T$$

En algunas ocasiones se utiliza el valor inverso de este coeficiente y se denomina *módulo de elasticidad volumétrica*, K .

$$K = \frac{1}{\beta} = \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)}{\rho}$$

$\beta = 0 \rightarrow$ Líquidos perfectos

$\beta = \infty \rightarrow$ Gases

$$\beta_{\text{agua}} = 2,100 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

I.4.9.-Presión de vapor y punto de ebullición

En la superficie de un líquido a cualquier temperatura hay un constante movimiento de las moléculas (en todas las direcciones y con todas las velocidades posibles) que escapan de dicha superficie, es decir, es aquí cuando se dice que el líquido se evapora.

Las moléculas que posean una energía cinética mayor que las fuerzas de atracción podrán escapar del líquido, produciéndose así su evaporación. Las moléculas liberadas quedan sobre la superficie del líquido y contribuyen a aumentar la presión del gas exterior con una presión parcial que se denomina presión de vapor (P_v).

En un líquido que se encuentre en un recipiente cerrado con espacio libre sobre su superficie, esta tensión de vapor irá aumentando hasta que el número de moléculas que entran en el líquido se igualen con las que salen, estableciendo un equilibrio entre el líquido y su P_v , que se conoce como Presión Máxima de Saturación. Dicha "PMS" varía en función de la naturaleza del líquido y de la temperatura (a mayor temperatura mayor presión de vapor).

Es conveniente saber que todo fluido tiene una presión de vapor arriba de su punto de congelación.

Si en algún momento la presión absoluta es menor que la P_v a una temperatura constante, el líquido hierve. Si posteriormente la presión absoluta aumenta hasta ser mayor que la P_v , el líquido se condensa.

En otras palabras la ebullición se da ya sea por dos condiciones:

- Un incremento de la temperatura cuando la presión sea constante y,
- Por una reducción en la presión a una temperatura constante.

I.4.10.-Tensión superficial (σ) y capilaridad

Es una fuerza que produce efectos de tensión en la superficie de los líquidos y se define como “el trabajo que hay que aplicar para aumentar en una unidad de superficie libre, allí donde el fluido entra en contacto con otro fluido no miscible, particularmente un cuerpo sólido o gas”.

La tensión superficial se debe a las fuerzas de atracción que se ejercen entre las moléculas de la superficie libre de un líquido, que son debidas a la cohesión entre sus moléculas y a la adhesión entre las moléculas del líquido y las paredes del recipiente.

Si consideramos una superficie “M” como se muestra en la figura I.2, entre un líquido y un gas, una molécula “A” de líquido cuya esfera de acción este sumergida, es atraída por igual por todas las que le rodean, es decir, en todos los sentidos (cohesión). Por otro lado si consideramos otra molécula “B”, cuya esfera de acción es secante a la superficie “M”, no estará sometida a la acción de fuerzas simétricas al no estar rodeada por moléculas de la misma naturaleza. Por lo que, “B” es atraída hacia la masa líquida por una fuerza normal a la superficie de separación y esta acción repercute en las moléculas vecinas, provocando reacciones tangenciales a la superficie “M”, que constituyen la tensión superficial. La dirección de dichas reacciones dependerá de que la superficie deformada sea cóncava o convexa.

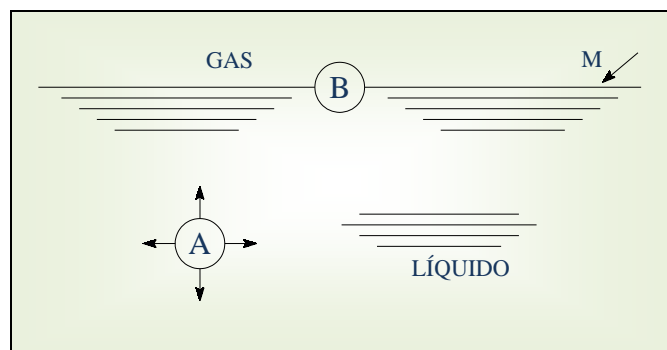


Fig. I.2 Tensión Superficial

*fuente (25) 10 pp.

La tensión superficial también explica los fenómenos de formación de meniscos y de la elevación o descenso del líquido en tubos capilares.

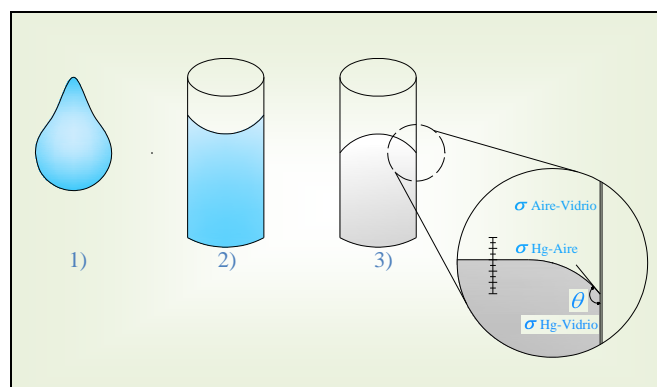


Fig. I.3 Fenómeno de formación de meniscos

1.-Cohesión>Adhesión 2.- Adhesión>Cohesión 3.- Adhesión<Cohesión

Los casos que se pueden presentar en función del balance entre las fuerzas de cohesión y adhesión son los siguientes (figura I.3):

1. Cohesión > Adhesión con el aire: el líquido libre adquiere una forma determinada sin necesidad de recipiente. Es el caso de las gotas de agua que adquieren una forma esférica y solo es válido para volúmenes pequeños.
2. Adhesión > Cohesión: se forma un menisco cóncavo al elevarse el líquido en contacto con el contorno sólido.
3. Adhesión < Cohesión: Se forma un menisco convexo. En este caso la formación del menisco ocasiona errores de lectura por efecto de capilaridad

En la figura I.4 se muestran las tensiones superficiales del aire-vidrio, aire-mercurio y mercurio-vidrio actuando sobre las superficies de frontera; la ecuación de equilibrio es:

$$\sigma_{\text{Aire-Vidrio}} - \sigma_{\text{Líquido-Vidrio}} = \sigma_{\text{Líquido-Aire}} \cos\theta$$

Si el valor de $\theta < 90^\circ$ la pared del recipiente es mojado por el líquido, como es el caso del agua y en cambio si $\theta > 90^\circ$ el líquido no moja la pared, como es el caso del mercurio.

En la figura I.4 se muestra la variación de altura que se da por efectos de capilaridad.

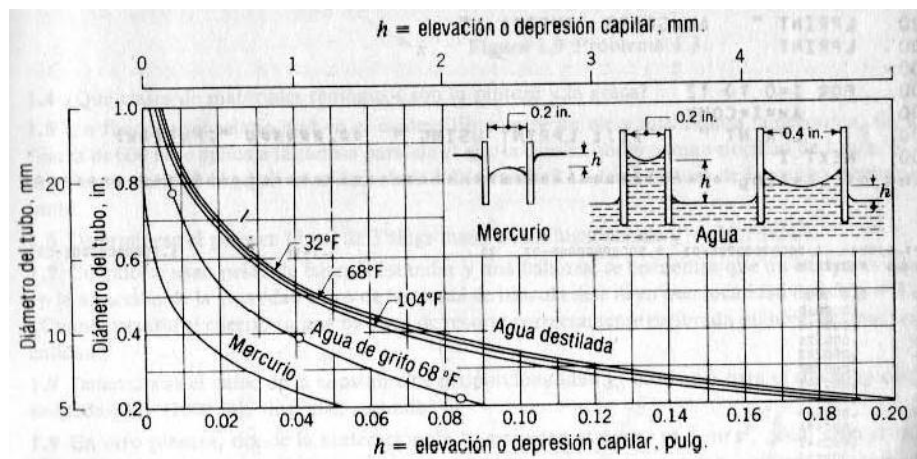


Fig. I.4 Efecto de capilaridad en tubos de vidrio

*fuente (19) 19 pp.

I.5.-Características de flujo en tuberías

1.5.1.-Caudal volumétrico

El caudal volumétrico o flujo volumétrico se denota Q , el cual es el volumen de fluido (V) que pasa a través de un área transversal en un intervalo de tiempo definido (t).

$$Q = \frac{V}{t}$$

1.5.2.-Velocidad de flujo

Rara vez la velocidad de flujo es uniforme en la sección transversal de la tubería. Por lo que se recomienda el uso de velocidades promedio. La velocidad promedio se define como:

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

I.5.3.-Caudal másico

Es la cantidad de masa que pasa por un punto dado.

$$w = \rho Q$$

1.5.4.-Experimento de Reynolds

Reynolds inyectó un trazador dentro de un líquido que fluía por una tubería. A velocidades bajas del líquido, el trazador se mueve linealmente en la dirección axial del fluido. Sin embargo a mayores velocidades, las líneas del flujo del fluido se desorganizan y el trazador se dispersa rápidamente después de su inyección en el líquido como se muestra en la figura I.5.

Principio de similitud de Reynolds

La similitud dinámica se da cuando las fuerzas en dos contrapartes de ambos sistemas guardan una relación constante mientras que en la cinemática la relación constante se da entre las velocidades correspondientes. La similitud cinemática asegura la existencia de la dinámica, ya que las velocidades son consecuencia de las fuerzas aplicadas localmente.

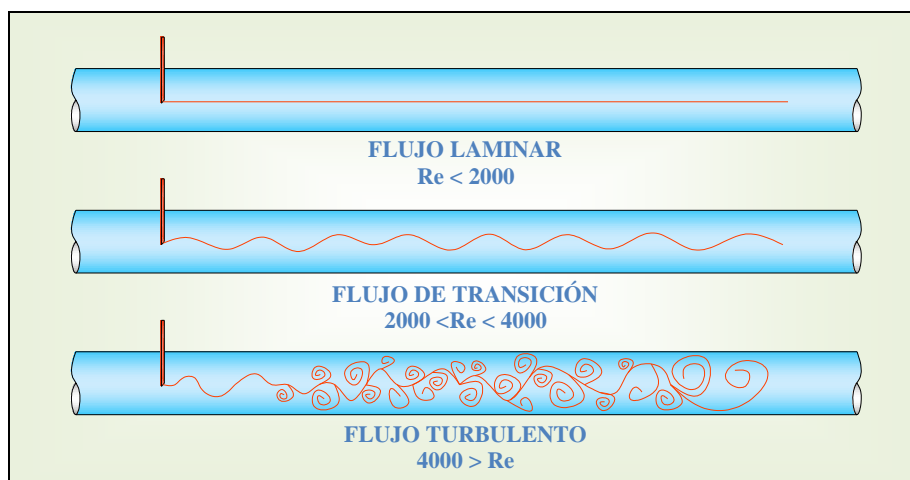


Fig. I.5 Diversos regímenes de flujo (experimento de Reynolds)

Si tomamos dos fluidos diferentes A y B, cada uno en tuberías geoméricamente similares pero diferentes en tamaño, y los hacemos fluir a diferentes velocidades medias, en ausencia de fuerzas de tensión superficial y fuerzas gravitacionales, la igualdad del número de Reynolds garantiza la similitud dinámica y cinemática. Entonces se dice que ambos fluidos son dinámicamente similares.

I.5.5.-Flujo laminar, turbulento y zona crítica

●Flujo laminar:

A velocidades bajas los fluidos tienden a moverse sin mezclarse lateralmente, y las capas contiguas se deslizan más sobre otras. En flujo laminar no existen corrientes transversales ni torbellinos. En la figura I.6 se puede observar el perfil de velocidades del flujo laminar.

La agitación de las moléculas se da solo de naturaleza molecular y dichas moléculas están restringidas a moverse en trayectorias paralelas. Se forman un conjunto de capas o láminas. Los módulos de las velocidades de capas adyacentes no tienen el mismo valor.

Los valores que nos ayudan a delimitar el flujo laminar son $Re < 2,000$.

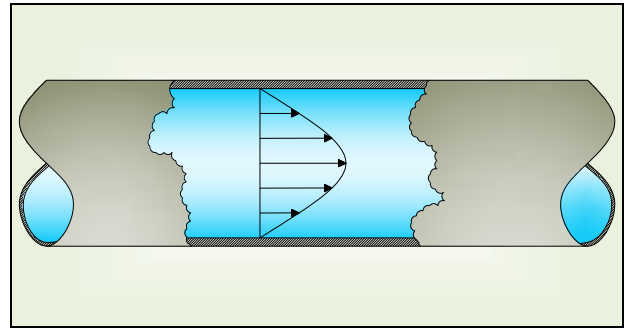


Fig. I.6 Perfil de velocidades de Flujo Laminar
*(13) 225 pp.

El término “Entrance Transition Length” (L') es para la distancia entre la entrada de la tubería y la sección la cual se consigue el flujo laminar totalmente desarrollado y se calcula por medio de la formula de Langhaar:

$$L' = 0.058 Re D$$

●Flujo turbulento:

Es el movimiento caótico de un fluido, en donde las partículas se mueven desordenadamente y sus trayectorias se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible, más precisamente caótica. En la figura I.7 se muestra el perfil de velocidades que describe un flujo turbulento. Para delimitar el flujo turbulento se tiene el valor de $Re > 4,000$

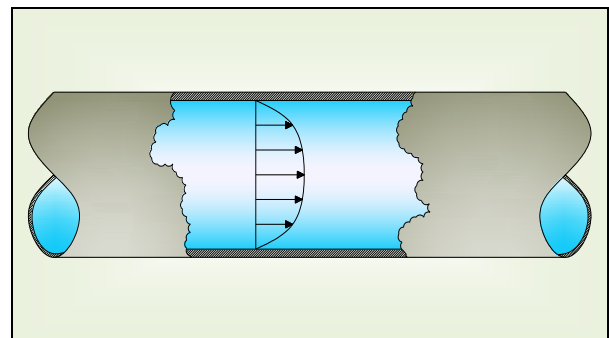


Fig. I.7 Perfil de velocidades de Flujo Turbulento
*(13) 225 pp.

●Zona crítica:

La región que se conoce como la zona crítica, es la que aparece entre los números de Reynolds de 2,000 a 4,000. En esta región el flujo puede ser tanto laminar como turbulento, dependiendo de varios factores: estos incluyen cambios de la sección, de dirección del flujo y obstrucciones tales como válvulas corriente arriba de la zona considerada. El factor de fricción en esta región es indeterminado y tiene límites más bajos si el flujo es laminar y más altos si el flujo es turbulento.

I.6.-Análisis dimensional

En la mecánica de fluidos las variables involucradas en cualquier situación física real pueden ser agrupadas en cierto número de grupos adimensionales independientes los cuales permiten caracterizar cualquier fenómeno físico.

La técnica de análisis adimensional adquiere relevancia sobre todo en la planificación de experimentos y presentación de resultados en forma compacta, sin embargo se utiliza con frecuencia en estudios de tipo teórico, y en el caso de este trabajo se emplea para la obtención de la ecuación de Darcy.

Permite también relacionar los datos medidos en un modelo experimental con la información requerida para el diseño de un prototipo a escala real. Al proporcionar las leyes de escala correspondientes, cuyo componente principal es la similitud geométrica y la igualdad de los parámetros adimensionales que caracterizan el objeto de estudio, entre modelo y prototipo.

Sin embargo la técnica de análisis dimensional no puede predecir qué variables son importantes ni permite explicar el mecanismo involucrado en el proceso físico. Si no es con ayuda de las pruebas experimentales.

Existen tres principios fundamentales del análisis dimensional:

1. Todas y cada una de las dimensiones físicas pueden expresarse como productos de potencias de un número muy pequeño de magnitudes fundamentales.
2. Las ecuaciones físicas deben ser homogéneas es decir, debe ser una de la misma ecuación, de dimensiones de todos los términos aditivos. Todos los términos que figuren como sumandos deben tener las mismas dimensiones cuando se expresan en función de las unidades fundamentales elegidas.
3. Cualquier relación general entre magnitudes físicas pueden expresarse de un modo generalizado, independientemente del sistema particular de unidades elegidos, interviniendo solo los productos no dimensionales de todas las variables físicas, además de las constantes necesarias de conversión este principio se deduce de los anteriores y es conocido como teorema de Buckingham o “teorema Pi”.

I.6.1.-Parámetros adimensionales importantes de flujo de fluidos

Hay grupos adimensionales que se presentan en casi todos los problemas de flujo de fluidos y tiene significado físico, por lo que son ordinariamente para caracterizar el flujo.

La matriz adimensional esta simplemente formada por la tabulación de los exponentes de las dimensiones fundamentales las cuales aparecen en cada una de las variables incluidas como se muestra en la tabla I.3.

MAGNITUD	SÍMBOLO	UNIDADES
Longitud	L	m
Masa	m	Kg
Tiempo	t	s

Tabla. I.3 Magnitudes fundamentales (sistema Lmt)

En la tabla I.4 se muestran las variables de principal relevancia en los procesos de flujo de fluidos.

VARIABLE	SÍMBOLO	DIMENSIÓN, SISTEMA Lmt
Viscosidad	μ	$mL^{-1}t^{-1}$
Viscosidad cinemática	ν	$L^2 t^{-1}$
Densidad	ρ	mL^{-3}
Tensión superficial	σ	$m t^{-2}$
Caída de presión	ΔP	$mL^{-1} t^{-2}$
Velocidad del fluido	u	$L t^{-1}$
Longitud del tubo	L	L
Diámetro del tubo	D	L
Rugosidad de la pared del tubo	ε	L
Aceleración de la gravedad	g	$L t^{-2}$

Tabla. I.4 Variables y expresiones dimensionales relevantes en flujo de fluidos

Tomando como base estas variables en la tabla I.5 se muestran los parámetros dimensionales, más importantes en la mecánica de fluidos:

GRUPO ADIMENSIONAL	DESIGNACIÓN	EXPRESIÓN
Numero de Reynolds	Re	$\rho VL/\mu$
Numero de Froude	Fr	V^2/Lg
Numero de Euler	Eu	$\Delta P/\rho V^2$

Tabla. I.5 Parámetros importantes en mecánica de fluidos

I.6.2.-Teorema Pi (π)

Este teorema proporciona un método de construcción de parámetros adimensionales incluso cuando la forma de la ecuación es desconocida. De acuerdo con este teorema, el número de grupos adimensionales independientes que puede emplearse para describir un fenómeno en el que intervienen n variables es igual al número $n-j$, donde j usualmente es el número de dimensiones básicas necesarias para expresar las variables dimensionalmente.

$$i = n - j$$

Aplicación del teorema Pi

Para la construcción completa de un sistema de grupos adimensionales, se debe seguir el siguiente método el cual nos dará el número mínimo de grupos adimensionales:

- 1) Escribir una relación funcional para la relación dimensional que se investiga, asegurándose de incluir todos los parámetros dimensionales relevantes. Así podemos escribir el factor de fricción (f) en una tubería recta de sección circular, que depende de:

$$f = f(h_f, L, D, u, \rho, \mu, \varepsilon)$$

Tomando en cuenta que las pérdidas por fricción son proporcionales a la longitud de la tubería no es necesario que ambas variables se muestren en la lista. Por lo cual se tomara las pérdidas por fricción para poder ser representada de la siguiente manera:

$$B_f = \frac{h_f}{L}$$

Ya que B_f es adimensional se requiere transformarla en una variable dimensional y esto lo aremos multiplicándola por el peso específico γ . Por lo tanto γB_f será una energía por unidad de volumen de fluido y de longitud de tubería, por lo cual obtendríamos las siguientes variables:

$$f = f(\gamma B_f, D, u, \rho, \mu, \varepsilon)$$

- 2) Determinar el número de parámetros adimensionales que se requieren construir. Para ello cada variable la expresamos dimensionalmente:

En donde tenemos 6 variables (n) y 3 dimensiones (j). Por tanto el número de grupos adimensionales que tendremos es de:

$$i = n - j = 6 - 3 = 3 \text{ grupos adimensionales.}$$

VARIABLE	DIMENSIÓN
γB_f	$m/L^2 t^2$
D	L
u	L/t
ρ	m/L^3
μ	$m/(L t)$
ε	L

- 3) Cálculo de los grupos adimensionales. La relación funcional se expresa dimensionalmente, elevando las variables dependientes a coeficientes:

Considerando que el centro de los grupos consiste de las variables u , D , y ρ , los grupos formados serán:

$$\pi_1 = u^a, D^b, \rho^c, \gamma B_f \quad \pi_2 = u^d, D^e, \rho^f, \varepsilon \quad \pi_3 = u^g, D^h, \rho^i, \mu$$

Considerando cada grupo independiente de los otros se tiene:

Para: $\pi_1 = u^a, D^b, \rho^c, \gamma B_f$

$$m^0 L^0 t^0 = \left(\frac{L}{t}\right)^a, L^b, \left(\frac{m}{L^3}\right)^c : \frac{m}{L^2 t^2}$$

$$m: 0 = c + 1 \quad (1)$$

$$L: 0 = a + b - 3c - 2 \quad (2)$$

$$t: 0 = -a - 2 \quad (3)$$

de (1): $c = -1$

de (3): $a = -2$

y sustituyendo en (2): $b = 1$

$$\pi_1 = u^{-2}, D^{-1}, \rho^{-1}, \gamma B_f \quad \pi_1 = \frac{\gamma B_f D}{\rho u^2}$$

Para: $\pi_2 = u^d, D^e, \rho^f, \varepsilon$

$$m^0 L^0 t^0 = \left(\frac{L}{t}\right)^d, L^e, \left(\frac{m}{L^3}\right)^f : \varepsilon$$

$$m: 0 = f \quad (4)$$

$$L: 0 = d + e - 3f + 1 \quad (5)$$

$$t: 0 = -d \quad (6)$$

de (4): $f = 0$

de (6): $d = 0$

y sustituyendo en (5): $e = -1$

$$\pi_2 = u^0, D^{-1}, \rho^0, \varepsilon \quad \pi_2 = \frac{\varepsilon}{D}$$

Para: $\pi_3 = u^g, D^h, \rho^i, \mu$

$$m^0 L^0 t^0 = \left(\frac{L}{t}\right)^g, L^h, \left(\frac{m}{L^3}\right)^i : \frac{m}{Lt}$$

$$m: 0 = i + 1 \quad (10)$$

$$L: 0 = g + h - 3i - 1 \quad (11)$$

$$t: 0 = -g - 1 \quad (12)$$

de (10): $i = -1$

de (12): $g = -1$

y sustituyendo en (11): $h = -1$

$$\pi_3 = u^{-1}, D^{-1}, \rho^{-1}, \mu \quad \pi_3 = \frac{\mu}{uD\rho} = \frac{1}{Re}$$

De acuerdo con el teorema de Buckingham, existe una relación funcional que vincule a los tres números, por lo tanto, cualquiera de ellos puede expresarse en función de los otros dos.

$$\frac{\gamma B_f D}{\rho u^2} = f \text{ Re}, \varepsilon/D$$

$$\frac{\gamma}{\rho} = g$$

$$B_f = \frac{h_f}{L}$$

Sustituyendo y multiplicando y dividiendo el segundo término de la ecuación se obtiene:

$$h_f = 2f_l \frac{Re, \varepsilon/D}{2g} \frac{u^2 L}{D}$$

El término: $2f_l \frac{Re, \varepsilon/D}{2g}$ se define como el factor de fricción (f) y despejándolo se obtiene la ecuación de Darcy–Weisbach la cual se emplea en los cálculos de los resultados de este trabajo de tesis.

$$f = \frac{2gD}{Lu^2} h_f$$

II.7.-Manómetros

Los principios que se aplican a la medición de presión se utilizan también en la determinación de temperaturas, flujos y niveles de líquidos. Por lo tanto, es muy importante conocer los principios generales de operación, los tipos de instrumentos, los principios de instalación, la forma en que se deben mantener los instrumentos y la manera como se calibran.

Cuando los manómetros deben indicar fluctuaciones rápidas de presión se suelen utilizar sensores piezoeléctricos o electrostáticos que proporcionan una respuesta instantánea. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los manómetros miden la diferencia entre la presión del fluido y la presión atmosférica local, entonces hay que sumar ésta última al valor indicado por el manómetro para hallar la presión absoluta.

II.7.1.-Clasificación de manómetros

Los manómetros se clasifican en dos grupos:

- a) Manómetros del tipo abierto; con una superficie atmosférica en un brazo y capaz de medir presiones manométricas.
- b) Manómetros diferencial; sin superficie atmosférica y que sólo puede medir diferencias de presión.

II.7.2.-Tipos de manómetros

- Manómetro de Burdon
- Manómetro de columna de líquido
- Manómetro de tubo en U: La forma más tradicional de medir presión en forma precisa utiliza un tubo de vidrio en forma de "U", donde se deposita una cantidad de líquido de densidad conocida (para presiones altas, se utiliza habitualmente mercurio para que el tubo tenga dimensiones razonables).

La diferencia entre los niveles es función de las presiones aplicadas y del peso específico de líquido del instrumento. El área de la sección de los tubos no influye en la diferencia de niveles. Se fija entre las dos ramas una escala graduada para facilitar las medidas.

El manómetro en forma de "U" conforma un sistema de medición absoluto y no depende, por lo tanto, de calibración.

Su desventaja principal es la longitud de tubos necesarios para una medición de presiones altas.

El manómetro en forma de “U” como el que se muestra en la figura I.8 fue el instrumento utilizado en la medición de caídas de presión en este trabajo de tesis.

La ecuación $\Delta P = \Delta h \cdot \Delta \gamma$ se utiliza para cálculos los cambios a través de una columna de un manómetro.

- **Manómetro de tubo inclinado:** Se usa para presiones manométricas inferiores a 250mm de columna de agua. Una de las ramas del manómetro se inclina con respecto a la vertical para alargar la escala.

Los manómetros de tubo en “U” y los de depósito tienen una aproximación del orden de 1mm en la columna de agua, mientras que el de tubo inclinado, con su columna más larga aprecia hasta 0.25mm de columna de agua.

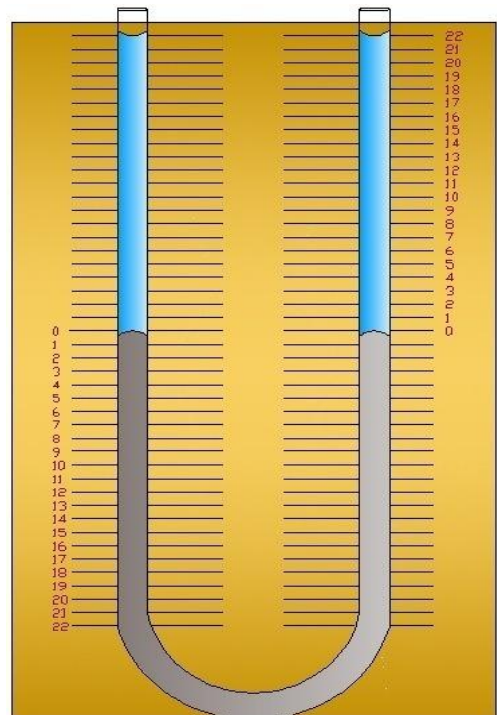


Figura I.8 Manómetro en “U”

- **Manómetro de McLeod:** Es un instrumento utilizado para medir bajas presiones. A menudo se emplea para calibrar otros manómetros de bajas presiones que tienen un uso más práctico.

La desventaja que tiene este manómetro es la discontinuidad en las lecturas, además que necesita de cierta manipulación para poder hacer cada lectura y que dicha lectura es visual y por tanto es subjetiva. En la figura I.9 se muestra el manómetro McLeod de la marca ABB, con el cual se cuenta y se podría acondicionar al equipo de tuberías lisas.



Fig. I.9 Manómetro McLeod ABB modelo 691 HT

II.8.-Medidores de flujo

II.8.1.-Factores para la elección de medidores de flujo

- **Rango:** Los medidores disponibles en el mercado pueden medir flujos desde mm^3/s hasta miles de m^3/s . Para una instalación de medición en particular, debe conocerse el orden de magnitud general de la velocidad de flujo así como el rango de las variaciones esperadas.
- **Exactitud requerida:** La mayoría de los medidores en el mercado tienen una exactitud del 2 al 3% y algunos tienen una exactitud de más del 0.5%.
- **Pérdida de presión:** Debido a que los detalles de construcción de los distintos medidores son muy diferentes, éstos proporcionan diversas cantidades de pérdida de presión conforme el fluido corre a través de ellos. Excepto algunos tipos, los medidores de fluido llevan a cabo la medición estableciendo una restricción o un dispositivo mecánico en la corriente de flujo, causando así la pérdida de presión.

- **Tipo de fluido:** El funcionamiento de los medidores de flujo se encuentra afectado por las propiedades y condiciones del fluido. Una consideración básica es si el fluido es un líquido o un gas. Otros factores que pueden ser importantes son la viscosidad, la temperatura, la corrosión, la conductividad eléctrica, la claridad óptica, las propiedades de lubricación y homogeneidad.
- **Calibración:** Se requiere de calibración en algunos tipos de medidores de flujo. Algunos fabricantes proporcionan una calibración en forma de una gráfica o esquema del flujo real versus indicación de la lectura. Algunos están equipados para hacer la lectura en forma directa con escalas calibradas en las unidades de flujo que se deseen. En el caso del tipo más básico de los medidores, tales como los de cabeza variable, se han determinado formas geométricas y dimensiones estándar para las que se encuentran datos empíricos disponibles. Estos datos relacionan el flujo con una variable fácil de medición, tal como una diferencia de presión o un nivel de fluido.

II.8.2.-Tipos de medidores de flujo

II.8.2.1.-Medidores de cabeza variable

El principio con el que trabaja dichos medidores es la diferencia de presión que tiene el fluido al pasar por el medidor. Esto se debe a la restricción al paso al fluido. Algunos tipos de los medidores de cabeza variable son:

- Placa orificio
- Tubo Venturi
- Boquilla o tobera de flujo

II.8.2.2.- Medidores de área variable

- De vórtice
- De Turbina
- Tubo Pitot
- Fluxómetro electromagnético
- Fluxómetro de Ultrasonido
- **Rotámetro:** El rotámetro es un medidor de área variable que consta de un tubo transparente que se amplía y un medidor de flotador más pesado que el líquido el cual se desplaza hacia arriba por el flujo ascendente de un fluido en la tubería. El tubo se encuentra graduado para leer directamente el caudal. La ranura en el flotador hace que rote y, por consiguiente, que mantenga su posición central en el tubo. Entre mayor sea el caudal, mayor es la altura que asume el flotador.



Fig. I.10 Rotámetro

El equipo de tuberías lisas en el cual se realizó la experimentación cuenta con tres rotámetros de diferentes flujos, (0–50) *GPM*, (0–10) *GPM* y de (0 – 1) *GPM*, como los que se muestran en la figura. I.0

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

II. FUNDAMENTOS TEORICOS

En la mecánica de fluidos existen dos descripciones que nos ayudan a poder comprender los fenómenos de un fluido dentro de un sistema.

La descripción Euleriana la cual se basa en el modelo de volumen de control y la descripción Lagrangiana que lo hace desde el punto de vista de un volumen material.

II.1.- Volumen de control

Las leyes de conservación de masa, energía y momento lineal, la mayoría de las veces se refieren a un sistema y a la interacción con sus alrededores. El sistema se define como una determinada cantidad de fluido de identidad conocida. Sin embargo, en el flujo de fluidos no es fácil identificar las partículas individuales. Como resultado, la atención se centra en un cierto espacio a través del cual fluye el fluido. A este espacio se le denomina volumen de control, que no es más que una región constante en el espacio a través de la cual fluye el fluido.

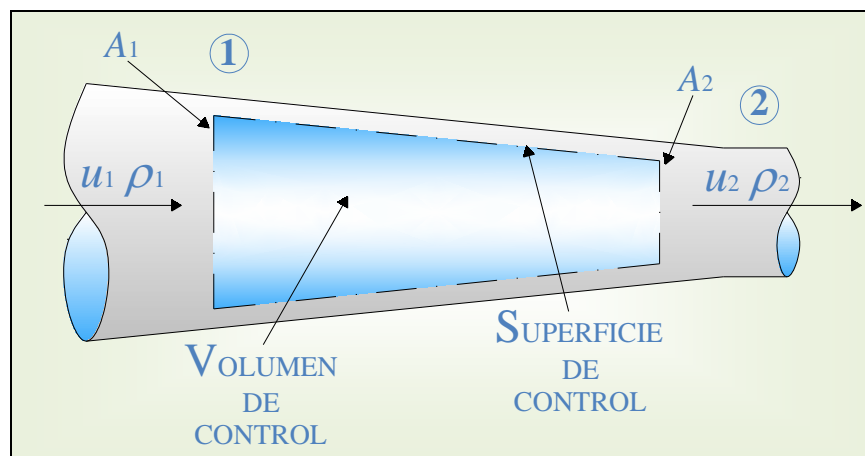


Fig. II.1 Volumen de Control para el flujo a través de un ducto

En la figura. II.1 se muestra el caso de un fluido que pasa a través de un conducto. La superficie de control que se representa como una línea punteada, es la superficie que rodea al volumen de control.

II.2.-Volumen material

A diferencia del volumen de control este, no se encuentra fijo en el espacio; sino que puede modificarse siempre y cuando la cantidad de materia que lo integra se mantenga constante. Por lo cual el volumen material esta en función del tiempo.

En la figura II.2 se puede observar como el volumen en estudio puede variar su forma con respecto al tiempo pero manteniendo constante la cantidad de materia.

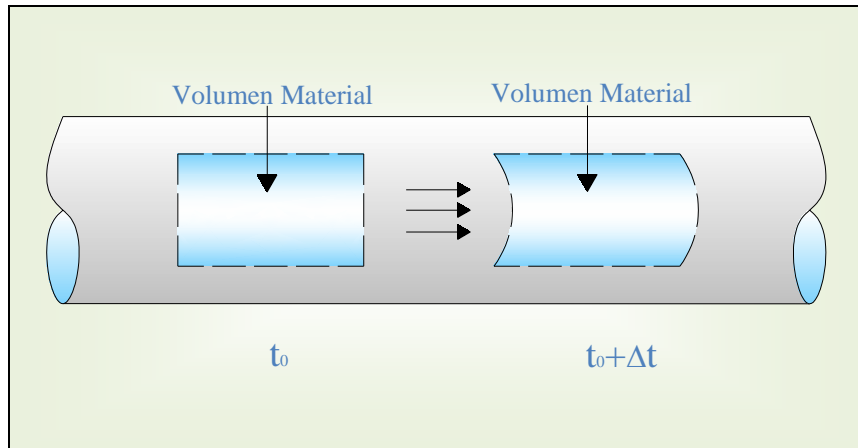


Fig. II.2 Volumen Material para el flujo a través de un ducto

II.3.-Ecuación de conservación de masa

Es esencial aplicar los principios de la ley de conservación de la masa en la solución de problemas de flujo en la mayoría de los casos a la totalidad del sistema o solo a una sección del mismo.

Para un sistema en donde no existe generación de materia:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

En caso de que exista acumulación y generación:

$$\text{Salida} - \text{Entrada} + \text{Acumulación} = \text{Generación}$$

En la figura II.1 se muestra un sistema simple de flujo en el que el fluido entra a la sección 1 de área transversal A_1 , con una velocidad promedio u_1 y una densidad ρ_1 . El fluido sale por la sección 2 con una velocidad promedio u_2 y una densidad ρ_2 . Por lo tanto el balance de masa, quedaría de la siguiente manera:

$$\dot{m}_1 = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dot{m}_2 \quad (\text{II.1})$$

La ecuación (II.1) se le conoce como la ecuación de continuidad. Es valida para todo tipo de fluido (gas o líquido).

II.4.-Ecuación de conservación de energía

La segunda propiedad que debe considerarse en los balances globales del volumen de control es la Energía.

No es posible poder describir una definición contundente de energía, puesto que la energía no es un ente físico real, ni un "cuerpo intangible" sino un número escalar que se le asigna al estado del sistema físico, es decir, la energía es una herramienta o abstracción matemática de una propiedad de los sistemas.

De la ecuación de energía se puede deducir la Ecuación de Bernoulli, pero es importante aclarar que ambas ecuaciones son independientes entre sí.

El cambio en energía de un sistema es igual a la diferencia entre el calor Q agregado al sistema y el trabajo W hecho por el sistema,

$$\Delta E = Q - W \quad (\text{II.2})$$

Esta es la primera ley de la termodinámica en su forma usual y útil para sistemas de corriente única en régimen permanente.

Puesto que la masa lleva consigo una energía que depende de su posición, movimiento o estado físico, todos estos tipos de energía aparecen en el balance de energía. Además, también puede transportarse energía a través del límite del sistema sin transferencia de masa.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{de presión} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{potencial} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{cinética} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{de bomba} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{por fricción} \end{array} \right) = 0 \quad (\text{II.3})$$

O más específicamente:

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta U = Q - W \quad (\text{II.4})$$

- Energía potencial (ΔE_k) zg , de una unidad de masa de fluido, es la energía presente debido a la posición de la masa en un campo gravitacional g , donde z es la altura relativa en metros desde un plano de referencia.
- Energía cinética (ΔE_p) $\frac{u^2}{2g}$, de una unidad de masa de fluido, es la energía presente debida al movimiento de traslación o rotación de la masa, donde u es la velocidad con respecto al límite del sistema en cierto punto.
- Energía interna (ΔU), de una unidad de masa de un fluido, es toda la demás energía presente, tal como de rotación o vibración de enlaces químicos. La energía interna de un sistema se puede modificar de varias maneras equivalentes, realizando un trabajo o transfiriendo energía en forma de calor.

Consideremos entonces el elemento de la figura (II.2), que se mueve de la sección I a la sección II. Los valores de ambas secciones son diferentes.

Sustituyéndolos en la ecuación (II.4) tanto para la sección I como la sección II y tomando en cuenta que no se agrega o pierde energía del sistema (Q y W) se tiene:

$$z_1 \left(\frac{g}{g_c} \right) + \left(\frac{u_1^2}{2g_c} \right) + \left(\frac{P_1}{\rho} \right) = z_2 \left(\frac{g}{g_c} \right) + \left(\frac{u_2^2}{2g_c} \right) + \left(\frac{P_2}{\rho} \right) \quad (\text{II.5})$$

Esta ecuación (II.5) se le conoce como la ecuación de Bernoulli que es básicamente un balance de energía mecánica. También puede ser conocida o identificada como una variante de la ecuación de energía. La diferencia entre ellas es que la ecuación de Bernoulli es una ecuación de cantidad de movimiento aplicable a lo largo de la línea de corriente y la ecuación de energía es una ecuación aplicada entre dos secciones de un flujo. Aunque de igual manera ambas ecuaciones nos arrojan el mismo resultado es importante saber el fundamento de cada una de ellas.

Tomando en cuenta interacciones energéticas a medida que una corriente de materia fluye en régimen estacionario entre los puntos "1" y "2" de un sistema de tuberías, como se muestra en la figura II.3.

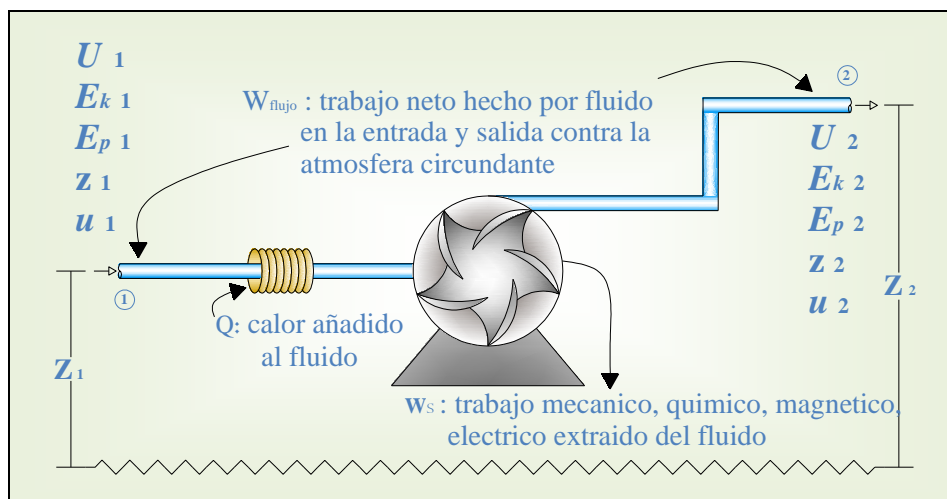


Fig. II.3 Aspectos de un sistema de tuberías de corriente única

Para cada kilogramo de fluido real circulante, con sus inevitables efectos de fricción, sin efectos de trabajo no usuales (magnéticos, eléctricos, superficiales o químicos) y con un valor constante de g_c . La siguiente ecuación es la ecuación de energía.

$$(z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g_c} \right) + \left(\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g_c} \right) + H_{ft} = W_{fluj0} \quad (II.6)$$

Ya que esta ecuación es de tipo general, sus términos no necesariamente son positivos (exceptuando H_{ft} , el cual siempre será positivo)

Por lo tanto siempre que el valor de W_{fluj0} sea mayor a cero, indica que se deberá aplicar trabajo y cuando el valor de W_{fluj0} se menor o igual a cero, el fluido podrá desplazarse sin necesidad de aplicar trabajo alguno.

El balance de energía mecánica, es el punto de partida para estimar los efectos mecánicos en el flujo de fluidos, pérdida de presión, potencia de bombeo, velocidades límites, etc.

II.4.1.-Aplicación del teorema de Bernoulli

La aplicación de dicho teorema debe de hacerse de forma sistemática, como lo sugiere el siguiente procedimiento:

- 1) Dibujar un esquema del sistema, seleccionando y marcando cada una de las secciones rectas bajo consideraciones.
- 2) Aplicar la ecuación de Bernoulli en la dirección del flujo. Seleccionar el plano de referencia para cada una de las ecuaciones escritas. Se escoge para esto el punto de menor elevación para que no existan signos negativos, reduciendo así el número de errores posibles.
- 3) Calcular la energía en la sección 1. En los líquidos, la altura de presión puede expresarse en unidades manométricas o absolutas, manteniendo las mismas unidades para la altura de presión en la sección 2.
- 4) Añadir en metros de fluido, toda energía adicionada al fluido mediante cualquier dispositivo mecánico, tal como bombas.
- 5) Restar en metros de fluido, cualquier energía perdida durante el flujo.
- 6) Restar, en metros de fluido, cualquier energía extraída mediante dispositivos mecánicos, tal como turbinas.
- 7) Igualar la anterior suma algebraica a la suma de las alturas de presión, de velocidad y elevación en la sección 2.
- 8) Si las dos alturas de velocidad son desconocidas, relacionar mediante la ecuación de continuidad.

II.4.2.-Restricciones de la ecuación de Bernoulli

- 1) Valida solo para fluidos incompresibles, ya que la densidad del fluido se toma para las ambas secciones de interés.
- 2) Para fluidos newtonianos
- 3) Fluidos con viscosidad constante
- 4) No debe haber transferencia de calor hacia dentro y fuera del fluido.
- 5) No puede haber depósitos mecánicos que pudieran agregar o eliminar energía al sistema, ya que la ecuación establece energía constante del fluido. (constante de energía)

II.5.-Ecuación de cantidad de movimiento

Es también conocida como la segunda ley de Newton y describe que: “La fuerza resultante que actúa en un sistema es igual a la velocidad con la que cambia la cantidad de movimiento del sistema”.

La ecuación de cantidad de movimiento lineal relaciona la cantidad de movimiento lineal del fluido con las fuerzas que actúan sobre él.

Mientras que la ecuación de cantidad de movimiento angular relaciona el movimiento angular del fluido con el momento o par de torsión que actúa sobre el fluido.

La ecuación mas empleada es la ecuación de cantidad de movimiento lineal y a menudo se le conoce como “la ecuación de cantidad de movimiento”, la cual se emplea para calcular las interacciones de fuerza entre un fluido de movimiento y objetos sólidos en contacto con él.

Para un elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$, se puede escribir el siguiente balance de cantidad de movimiento:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{acomulacion} \\ \text{de cantidad de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{entrada de} \\ \text{cantidad de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de salida de} \\ \text{cantidad de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Sumas de las} \\ \text{fuerzas que} \\ \text{actuan sobre} \\ \text{el sistema} \end{array} \right] \quad (\text{II.7})$$

Esta ecuación se aplica mejor comenzando con su forma general y evaluando los términos adecuadamente para un problema específico.

Ahora bien, en los problemas prácticos de flujo se requiere el empleo de dos de las tres ecuaciones referidas anteriormente (continuidad, energía y movimiento).

Siempre hay que tener presente que dichas ecuaciones son independientes y que todos los flujo deben de obedecer las leyes físicas que representan.

La diferencia que existe entre estas tres ecuaciones (continuidad, energía y movimiento) son:

- La ecuación de movimiento es de carácter vectorial (fuerza, cantidad de movimiento) mientras que las ecuaciones de continuidad y energía son de carácter escalar.
- La ecuación de continuidad y la ecuación de energía se derivan de leyes de conservación (ley de conservación de masa y ley de conservación de energía) lo cual nos indica que son ecuaciones conservativas, mientras que la ecuación de movimiento se deriva de un balance de fuerzas que actúan sobre el cuerpo.

Para fines de este trabajo de tesis solo se menciona el balance general de movimiento que se aplica a todos los problemas.

II.6.-Conceptos fundamentales del área de flujo

II.6.1.-Efecto de la rugosidad

En el interior de los tubos existen irregularidades de diferentes formas y tamaños cuyo valor medio se conoce como rugosidad absoluta (ϵ), y la cual puede definirse como “La variación media del radio interno de la tubería”.

Nikuradse realizó un experimento el cual consistió en pegar en el interior de un tubo de vidrio (liso) gránulos tamizados a diferentes diámetros de partícula, es decir, creo una rugosidad artificial conocida, hasta conseguir una pérdida de carga igual que la producida en un tubo comercial de un material determinado con igual longitud y diámetro que el de vidrio. Dicho experimento permitió determinar el valor de la rugosidad absoluta.

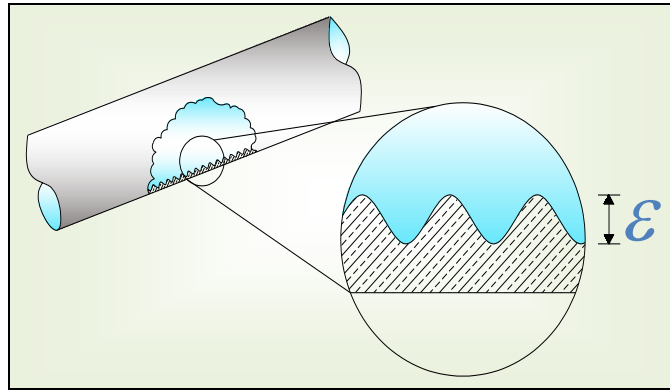


Fig. II.4. Rugosidad en tubería

La influencia de la rugosidad absoluta depende del diámetro de la tubería. Ya que un mismo valor de rugosidad absoluta puede ser muy importante para tuberías de diámetro pequeño y muy insignificante para tuberías de un gran diámetro.

Por ello, para caracterizar un tubo por su rugosidad resulta más adecuado utilizar la rugosidad relativa (ϵ/D), que se define como “el cociente entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería”.

La variación de la rugosidad con el paso del tiempo se vuelve un tanto imprecisa por lo cual se sugiere emplear la fórmula de Genijew:

$$\mathcal{E}T = \mathcal{E}0 + \alpha t \quad (\text{II.8})$$

Los valores de α están en función del tipo de fluido y se reportan en el anexo A-5 al igual que los valores de ϵ y ϵ/D de algunos materiales en los anexos A-3 y A-4 respectivamente.

I.6.2.-Número de Reynolds.

Es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido en estudio, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye. En otras palabras relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas de un fluido.

Es de gran ayuda para delinear la naturaleza del régimen con que fluye un fluido, lo que es fundamental para el estudio del mismo. Así, el número de Reynolds es un número adimensional que se define como:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \left\{ \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} \right\} \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{\rho}{\mu} = \frac{1}{\nu} \therefore Re = \frac{Du}{\nu} \qquad Re = \frac{4Q}{\pi Du}$$

Cuando el ducto es una tubería: D es el diámetro interno de la tubería. Cuando no se trata de un ducto circular, se emplea el diámetro equivalente (D_e) definido como:

$$D_e = 4 \left(\frac{\text{Área transversal de flujo}}{\text{Perímetro mojado}} \right) \quad (\text{II.10})$$

II.6.3.-Efecto del factor de fricción:

El factor de fricción es un coeficiente adimensional que expresa la relación entre el momento total transferido con respecto al momento transferido por: el rozamiento de las partículas del fluido con la tubería (ε) y por un mecanismo de turbulencia.

El factor de fricción (f) para condiciones de flujo laminar es función solo del número de Reynolds, mientras que para flujo turbulento no depende del número de Reynolds sino, de la rugosidad relativa (ε/D). Para tuberías muy lisas, como las de latón extruido o el vidrio, el factor de fricción disminuye más rápidamente con el aumento del número de Reynolds, que para tubería con paredes más rugosas.

$$f = f (Re, \varepsilon)$$

Si es conocido el factor de fricción, se puede hallar la pérdida de carga y por ende la caída de presión

Para el cálculo de " f " existen múltiples ecuaciones, las más importantes se explican en el siguiente apartado.

II.7.-Ecuaciones para el cálculo de f

II.7.1.-Fórmula de Hagen–Poiseuille

En la dinámica de fluidos, la ecuación de Hagen–Poiseuille, es una ley física que da la caída de presión en el líquido que fluye a través de un tubo largo y cilíndrico. Las hipótesis de la ecuación es que el flujo es laminar y viscoso incompresible y el flujo fluye a través de una superficie circular de sección constante que es significativamente más largo que su diámetro.

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{32\mu Lu}{g_c \rho D^2} \quad (\text{II.11})$$

II.7.2.-Fórmula de Blasius

Blasius propone una expresión en la que el factor de fricción viene dado en función del número de Reynolds, válida solo para tubos lisos, en los que la rugosidad relativa (ε) no afecta al flujo. Válida para $2,000 < Re < 100,000$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (\text{II.12})$$

II.7.3.-Fórmula de Prandtl y Von–Karman

Prandtl y Von-Karman amplían el rango de validez para el número de Reynolds de la fórmula de Blasius para tubos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (\text{II.13})$$

II.7.4.-Fórmula de Nikuradse

Nikuradse fue el primero que propone una ecuación válida para tuberías rugosas:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{3.71\varepsilon}{D} \right) \quad (\text{II.14})$$

Al igual que Nikuradse, Chen propone una ecuación en la cual considera la rugosidad.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \left(\frac{\varepsilon}{3.7065D} \right) - \left(\frac{5.0452}{Re} \right) \log \left[\left(\frac{1}{2.8257} \right) \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \left(\frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right] \right\} \quad (\text{II.15})$$

II.7.5.-Fórmula de Darcy–Weisbach

La ecuación de Darcy–Weisbach es la fórmula básica para el cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías y conductos. Es válida para cualquier líquido que fluye por una tubería, ya sea a flujo laminar o turbulento.

Sin embargo, puede suceder que debido a velocidades extremas, la presión corriente abajo disminuya de tal manera que llegue a igualar, la presión de vapor del líquido, apareciendo el fenómeno conocido como cavitación.

Con un apropiado razonamiento puede ser aplicada a tubería de diámetro constante o de diferentes diámetros por la que pasa un fluido donde la densidad permanece razonablemente constante a través de una tubería recta, ya sea horizontal, vertical o inclinada.

$$f = h_{pl} \frac{2g_c D}{Lu^2} \quad (\text{II.16})$$

Con esta ecuación se pueden calcular las pérdidas de cabeza para cualquier fluido newtoniano, considerando las viscosidades y densidades apropiadas. Esto podría ser la principal ventaja de aplicar dicha fórmula, ya que las otras fórmulas estudiadas son empíricas y sólo pueden aplicarse bajo condiciones muy específicas.

Para poder determinar f se puede recurrir a la ecuación de Colebrook–White, la cual relaciona f con el número de Reynolds, funciona para todo tipo de flujos y rugosidades.

Es la más exacta y universal, pero el problema radica en su complejidad y en que requiere de iteraciones: y actuando la rugosidad relativa (ε/D) como parámetro diferenciador de las curvas:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.71D} \right) + \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

Para el caso de tuberías lisas la rugosidad relativa, es muy pequeña por lo que el término puede despreciarse. Quedando en este caso la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log (Re \cdot \sqrt{f}) - 0.8 \quad (\text{II.18})$$

Pero existe una forma más fácil para poder obtener f , el diagrama de Moody. El cual fue desarrollado a partir de la ecuación de Colebrook–White y constituye una solución gráfica para el coeficiente de fricción de Darcy–Weisbach.

Poiseuille, fue el primero en determinar matemáticamente el factor de fricción de Darcy–Weisbach en flujo laminar y obtuvo una ecuación para determinar dicho factor, que es:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{II.19})$$

La cual es válida par tubos lisos o rugosos.

Para flujo turbulento el factor de fricción de Darcy–Weisbach se encuentra mediante la ecuación de Colebrook–White o por la ecuación de Swamee-Jain, la cual debe cumplir en un rango determinado.

Para $5 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^8$ y $1 \times 10^{-8} \leq \left(\frac{\varepsilon}{D}\right) \leq 1 \times 10^{-2}$

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln \left(\frac{0.27\varepsilon}{D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{II.20})$$

Posteriormente otros autores ajustaron los datos experimentales y expresaron el factor de fricción en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa con una fórmula explícita:

Barr:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.1286}{Re^{0.89}} \right) \quad (\text{II.21})$$

Haaland:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \quad (\text{II.22})$$

Moody:
$$f = 0.0055 \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{20,000 D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{II.23})$$

También existe el cálculo a través de la ecuación e S.W. Churchill que es una función obtenida por un método de ajuste no lineal. Esta ecuación es apta tanto para régimen laminar como turbulento.

$$f = \left\{ \left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \left[\left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} + \left(-2.457 \ln \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + \left(\frac{0.27\varepsilon}{D} \right) \right] \right)^{16} \right]^{-1.5} \right\}^{1/2} \quad (\text{II.24})$$

II.8.- Pérdidas generadas en el sistema

II.8.1.- Pérdidas lineales (h_{pl})

Las pérdidas lineales son aquellas producidas por las tensiones viscosas originadas por la interacción entre el fluido y las paredes de una tubería o un conducto.

En régimen laminar, los esfuerzos cortantes se pueden calcular de forma analítica en función de la distribución de velocidad en cada sección que se puede obtener a partir de las ecuaciones de Navier–Stokes, y las pérdidas de carga lineales se pueden obtener con la llamada ecuación de Hagen–Poiseuille.

$$h_{pl} = \frac{32\mu Lu}{g_c \rho D^2} \quad (\text{II.25})$$

Las ecuaciones de Navier–Stokes no es posible resolverlas analíticamente en régimen turbulento. Las pérdidas de carga dependen de la tensión cortante en la pared, y si la relacionamos con las variables implicadas tenemos:

$$\tau_w = f(u, D, \varepsilon, \mu, \rho)$$

Y a partir de la aplicación del teorema π de Buckingham se puede transformar en:

$$\frac{8\tau_w}{\rho u^2} = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

Tomando en cuenta la relación entre la tensión cortante en la pared y las pérdidas de carga:

$$\frac{8\tau_w}{\rho u^2} = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right) = \frac{h_{pl} D}{\left(\frac{Lu^2}{2g_c} \right)} \quad (\text{II.26})$$

Despejando las pérdidas de carga lineales, se obtiene la famosa ecuación de Darcy–Weisbach:

$$h_{pl} = f \frac{Lu^2}{2g_c D} = \frac{8fLQ^2}{g_c D^5 \pi^2} \quad (\text{II.27})$$

II.8.2.-Pérdidas singulares (h_{ps})

Son las pérdidas producidas por cualquier obstáculo que oponga una mayor o menor obstrucción al paso del flujo (ensanches o reducción brusca, entrada y salida a un depósito, entradas y salidas de las tuberías, codos, válvulas, cambios de sección, etc.). Para su estimación se puede emplear la siguiente expresión:

$$h_{ps} = \xi \frac{u^2}{2g_c} = \frac{8\xi}{g\pi^2 D^4} \quad (\text{II.28})$$

II.8.3.- Métodos para calcular las pérdidas por fricción totales (H_{ft})

Algunas de las alternativas para poder determinar el coeficiente de pérdidas locales son:

- Método de las longitudes equivalentes
- Método de las K's
- Método simplificado

II.8.3.1.- Métodos de las longitudes equivalentes

En este método se estima las pérdidas que tiene el accesorio suponiendo que este fuese un tramo de tubería recto, el cual debe producir el mismo efecto de pérdidas por fricción.

Por comparación de las ecuaciones (II.25) y (II.28), la longitud equivalente se relaciona con el coeficiente de pérdida singulares mediante:

$$L_{eq} = \xi \frac{D}{f} \quad (\text{II.29})$$

Por lo tanto la longitud equivalente total será:

$$L_T = L_{eq} + L_{tr} \quad (\text{II.30})$$

Ya que la longitud equivalente de los accesorios esta en función del diámetro, los datos reportados se presentan como (L/D). Por lo tanto para poder obtener la longitud equivalente se multiplica L/D por el diámetro interior (D_{int}) o bien en el anexo A-6 Se muestra un nomograma que permiten estimar las longitudes equivalentes para los casos de elementos singulares más comunes.

Con la longitud total se puede calcular las pérdidas por fricción totales de la siguiente manera:

$$H_{ft} = f \frac{L_T}{D} \left(\frac{u^2}{2g_c} \right) \quad (\text{II.31})$$

II.8.3.2.- Método de las K's

El flujo que atraviesa un accesorio en una línea de tubería causa una reducción de la altura. El coeficiente de pérdidas "K" se define como la pérdida de la altura de velocidad. El cual relaciona las pérdidas de energía mecánica que se producen en el elemento por unidad de masa de fluido circulante y una energía cinética por unidad de masa característica del flujo en el elemento.

Este método consiste en evaluar el coeficiente de carga de cada accesorio y la cantidad de cada uno de ellos presente en el sistema de flujo. Tomando en cuenta que en la mayoría de los accesorios las pérdidas por fricción a lo largo de la longitud real de flujo son mínimas por ello el coeficiente de pérdidas “K” se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds.

$$H_{ft} = \frac{K_T u^2}{2g_c} \quad (\text{II.32})$$

En el Anexo A-7 se muestran los coeficientes de pérdidas de algunos accesorios.

II.8.3.3.- Método simplificado

Ya que la fricción representa una pérdida de energía, puede considerarse como una caída de presión del fluido, obtenida experimentalmente. Y dividiendo esta caída de presión entre la densidad del fluido se obtiene:

$$H_{ft} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (\text{II.33})$$

II.9.-Diagrama de Moody

Este diagrama representa gráficamente en un formato doblemente logarítmico, dos ecuaciones:

- La ecuación de Hagen–Poiseuille, que es representada por medio de una recta y se utiliza para el régimen laminar.
- La ecuación de Colebrook–White, que esta representa por una familia de curvas, una para cada valor de (ε/D) . Las curvas para números de Reynolds bajos coinciden con la ecuación de Blasius y la ecuación de Prandtl–Karman, es decir, son asintóticas a una u otra ecuación y conforme el valor del número de Reynolds aumenta estas se van separando.

El diagrama de Moody es adimensional, utilizable en cualquier sistema de unidades. Los valores de la rugosidad utilizados para poder leer este diagrama son los de las tuberías comerciales, las cuales se reportan en el anexo A-8

La exactitud del diagrama de Moody puede llegar a tener una variación de $\pm 5\%$ en tuberías lisas y un $\pm 10\%$ en tuberías rugosas. Y es aun más impreciso si la longitud de la tubería es corta.

CAPITULO III

DISEÑO EXPERIMENTAL

III. DISEÑO EXPERIMENTAL

III.1.- Diseño factorial experimental 2^K

El diseño factorial experimental 2^K es un método estadístico que nos permite determinar el efecto que producen ciertos parámetros (K) al sistema que se analiza, además de que nos ayuda delimitar el rango de análisis, teniendo así una metodología de experimentación más eficaz.

En el diseño 2^K ($2 \times 2 \times 2 \dots = 2^K$ experimentos) se determina solo dos valores de cada parámetro, el menor representado por el signo (-) y el mayor por el signo (+).

Cada columna empieza por el signo (-), y se alternan los signos (-) y (+) con frecuencia 2^0 para X_1 , 2^1 para X_2 , 2^2 para X_3 , y así sucesivamente hasta X_K , donde los signos se alternan con una frecuencia 2^{K-1} .

En el caso de este trabajo de tesis se emplea dicho método para poder encontrar la relación entre determinados parámetros con respecto a la caída de presión en una tubería lisa. Por lo cual, se tiene que determinar dichos parámetros y para esto, se realizó un análisis de las ecuaciones ya existente y los objetivos generales del protocolo experimental de la practica “Análisis de caídas de presión en tuberías lisas” de sexto semestre de la carrera de Ingeniería Química.

Así, entonces; tenemos que la caída de presión en una tubería lisa se encuentra en función de diversos parámetros como lo expresa la siguiente ecuación:

$$\Delta P = f \left(D, u, L, \rho, \mu, \frac{\varepsilon}{D}, \dots \right)$$

Existen más parámetros que pueden influir en el efecto de la caída de presión, pero tomando en cuenta las ecuaciones reportadas en la literatura y la capacidad de medición de los demás parámetros, estas variables son las que producen un mayor efecto en la caída de presión.

Ahora bien de estos seis parámetros podremos omitir tres de ellos. Tomando en cuenta que la ρ y μ son propiedades en función de la temperatura, y se decide monitorear la temperatura del fluido para poder tener así un valor constante en ambos parámetros.

En el caso de la rugosidad absoluta o en este caso de la relación diámetro rugosidad (ε/D) es una propiedad que no puede ser medible tan fácilmente, por lo cual se emplea un valor reportado por la literatura y, ya que el material de las tuberías es el mismo para todos los casos, el valor solo varía por la relación (ε/D).

Aunque, si se decidiera realizar un análisis más extenso y preciso, todos y cada uno de los parámetros tendrían que ser controlados.

Por ejemplo, en este caso tanto la ρ como la μ tendrían que ser medidas al momento de la experimentación y no determinadas por medio de la temperatura del fluido. Y de la misma manera la rugosidad tendría que ser medida cada que se desarrollara dicho experimento ya que la rugosidad está en función del tiempo de vida de la tubería así como de su material.

Por lo tanto se tiene que para este caso en particular:

$$\Delta P = f(D, u, L)$$

Y a su vez estos tres parámetros se encuentran delimitados por el equipo.

En el caso del diámetro solo se cuenta con cinco diferentes diámetros en el equipo, para el caso de la longitud solo con tres longitudes, y para la velocidad (la cual relacionaremos con el caudal volumétrico) se encuentra limitada por la potencia de la bomba.

Teniendo así el caudal volumétrico (X_1), diámetro de tubería (X_2) y longitud de tubería (X_3).

Por lo tanto, para el caso de este diseño factorial 2^K será un diseño $2^3 = 8$ experimentos, como se muestra en la siguiente tabla.

MATRIZ DE EXPERIMENTOS			
	X_1	X_2	X_3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Tabla III.1 Matriz experimental para un diseño factorial 2^3

Para poder determinar el flujo más pequeño se realizaron cálculos variando el flujo por medio de la ecuación de Blasius, dichos valores no deben ser menores a 0.5 mmHg, ya que es el menor valor medible en el manómetro en U. Y el flujo más grande se determino ya que es una limitante de flujo de la bomba (12 a 13 GPM).

En el caso del diámetro se cuanta con cinco valores que van desde ½ hasta 1½ pulgadas, y el caso de la longitud de la tubería los valores son de 1 a 3 metros.

Tomando en cuenta estos criterios se obtiene las siguientes tablas.

MATRIZ DE EXPERIMENTOS		PLAN DE EXPERIMENTACIÓN		RESULTADOS TEÓRICOS	
X_1	X_2	Flujo (GPM)	Diámetro (in)	ΔP (mmHg)	
1	-	-	9	0.5	45.85
2	+	-	12	0.5	75.86
3	-	+	9	1.5	0.48
4	+	+	12	1.5	0.79

Tabla III.2 Matriz de experimentos de un diseño factorial completo 2^3 , plan de experimentación y respuestas teórica para una longitud de 1m.

MATRIZ DE EXPERIMENTOS		PLAN DE EXPERIMENTACIÓN		RESULTADOS TEÓRICOS	
X_1	X_2	Flujo (GPM)	Diámetro (in)	ΔP (mmHg)	
1	-	-	6	0.5	45.0
2	+	-	12	0.5	152.0
3	-	+	6	1.5	0.47
4	+	+	12	1.5	1.58

Tabla III.3 Matriz de experimentos de un diseño factorial completo 2^3 , plan de experimentación y respuestas teórica para una longitud de 2m.

MATRIZ DE EXPERIMENTOS		PLAN DE EXPERIMENTACIÓN		RESULTADOS TEÓRICOS	
X_1	X_2	Flujo (GPM)	Diámetro (in)	ΔP (mmHg)	
1	-	-	5	0.5	49.14
2	+	-	12	0.5	227.59
3	-	+	5	1.5	0.51
4	+	+	12	1.5	2.37

Tabla III.4 Matriz de experimentos de un diseño factorial completo 2^3 , plan de experimentación y respuestas teórica para una longitud de 3m.

El diseño experimental solo se emplea dos valores de cada parámetro y para el desarrollar el análisis de caídas de presión, dos valores no son lo suficientemente representativos, por lo cual, se decide emplear todos los valores intermedios posibles de los niveles (-, +) de cada parámetro.

Por lo tanto:

LONGITUD DE TUBERÍA (m)	DIÁMETRO DE TUBERÍA (in)	FLUJO (GPM)
1	½	5*
2	¾	6*
3	1	7
	1¼	8
	1½	9*
		10
		11
		12

Tabla III.5 En el caso de una longitud de 1m el flujo mínimo es de 9 GPM, para la longitud de 2m el flujo mínimo es de 6 GPM y para la longitud de 3m el flujo mínimo es de 5 GPM.

Teniendo como resultado de la implementación del diseño experimental las tablas III.1.2, III.1.3, III.1.4, y la tabla III.1.5 se prosigue con la realización de las corridas de cada uno de los parámetros.

En las siguientes tablas se muestran los datos experimentales obtenidos. En las tres tablas se muestran valores de ΔP promedio de las tres corridas hechas para cada diámetro con su respectiva variación de flujo y longitud.

Diámetro (in)	Flujo (GPM)	Experimento
½	9	001
	10	002
	11	003
	12	004
¾	9	005
	10	006
	11	007
	12	008
1	9	009
	10	010
	11	011
	12	012
1 ¼	9	013
	10	014
	11	015
	12	016
1 ½	9	017
	10	018
	11	019
	12	020

Tabla III.6 Plan completo de experimentación para una Longitud de 1m.

Diámetro (in)	Flujo (GPM)	Experimento
1/2	6	021
	7	022
	8	023
	9	024
	10	025
	11	026
	12	027
3/4	6	028
	7	029
	8	030
	9	031
	10	032
	11	033
	12	034
1	6	035
	7	036
	8	037
	9	038
	10	039
	11	040
	12	041
1 1/4	6	042
	7	043
	8	044
	9	045
	10	046
	11	047
	12	048
1 1/2	6	049
	7	050
	8	051
	9	052
	10	053
	11	054
	12	055

Tabla III.7 Plan completo de experimentación para una Longitud de 2m.

Diámetro (in)	Flujo (GPM)	Experimento
1/2	5	056
	6	057
	7	058
	8	059
	9	060
	10	061
	11	062
	12	063
3/4	5	064
	6	065
	7	066
	8	067
	9	068
	10	069
	11	070
	12	071
1	5	072
	6	073
	7	074
	8	075
	9	076
	10	077
	11	078
	12	079
1 1/4	5	080
	6	081
	7	082
	8	083
	9	084
	10	085
	11	086
	12	087
1 1/2	5	089
	6	090
	7	091
	8	092
	9	093
	10	094
	11	095
	12	096

Tabla III.8 Plan completo de experimentación para una Longitud de 3m.

III.2.- Clasificación de variables

Una vez empleado el diseño experimental se clasificaron algunas de las variables que conforman el sistema, en este caso las clasificaremos como:

VARIABLES A MONITORÉBLES	VARIABLES MONITOREABLES Y CONTROLABLES	VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLE DEPENDIENTE
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del fluido • Temperatura ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Nivelación del equipo • Renovación del Fluido • Nivel del tanque de almacenamiento • Estabilización del flujo 	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de tubería • Diámetro de tubería • Flujo 	<ul style="list-style-type: none"> • Caída de presión

Esta clasificación nos ayudara a tener un mayor control y descripción de desarrollo del método experimental.

CAPITULO IV

RESULTADOS

IV. RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los datos obtenidos en la experimentación con el equipo de tuberías lisas de PVC, el cual se muestra en el anexo A-9.

El procedimiento de operación del equipo de tuberías lisas así como su mantenimiento se describe detalladamente en el capítulo V dentro del protocolo propuesto.

La toma de resultado se realizó a una temperatura del fluido promedio de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para poder homogenizar la consistencia de los datos, se determinó realizar los cálculos a una temperatura de 20°C , empleando así los valores de ρ y μ a dicha temperatura. Ambos valores se reportaron en el anexo A-2.

El valor de la rugosidad absoluta se tomó como una tubería de PVC lisa y nueva, dicho valor como el de más materiales, se encuentran reportados en el anexo A-3.

En el anexo C se muestran las ecuaciones, y se detalla la memoria de cálculo que se empleó para la obtención de los resultados.

Los diámetros internos (D) de las diferentes tuberías se muestran en el anexo A-10.

Las constantes utilizadas en los cálculos son:

$$g_c = 1.0 \frac{\text{Kg}\cdot\text{m}}{\text{N}\cdot\text{s}^2} \qquad \pi = 3.1416$$

Los cálculos de los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas así como sus respectivas gráficas (ΔP & Q) y (Re & f).

Los valores de Q y ΔP se reportan en (GPM y $mmHg$) respectivamente y no en unidades del sistema internacional. Ya que estas son las escalas con las que cuentan los accesorios (rotámetros y manómetro en U).

En el anexo A-1 se muestran los factores de conversión empleados para la homogeneidad de las unidades.

IV.1.- Registro de datos experimentales de ΔP , f y $f_{teórico}$ en tubería de $\frac{1}{2}$ "

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \rightarrow •m/Kg)	f	f teórico	Exp
1	9	28.00	3.0092	4.647E+4	0.3927	0.0132	0.0216	001
1	10	34.00	3.3436	5.163E+4	0.4769	0.0130	0.0210	002
1	11	40.00	3.6779	5.679E+4	0.5610	0.0126	0.0205	003
1	12	48.00	4.0123	6.195E+4	0.6732	0.0127	0.0201	004

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \rightarrow •m/Kg)	f	f teórico	$Exp.$
2	6	24.50	2.0061	3.098E+4	0.3436	0.0130	0.0238	021
2	7	34.00	2.3405	3.614E+4	0.4769	0.0132	0.0229	022
2	8	44.00	2.6748	4.130E+4	0.6171	0.0131	0.0222	023
2	9	54.00	3.0092	4.647E+4	0.7574	0.0127	0.0216	024
2	10	66.00	3.3436	5.163E+4	0.9257	0.0126	0.0210	025
2	11	82.00	3.6779	5.679E+4	1.1501	0.0129	0.0205	026
2	12	96.00	4.0123	6.195E+4	1.3464	0.0127	0.0201	027

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \rightarrow •m/Kg)	f	f teórico	$Exp.$
3	5	27.00	1.6718	2.581E+4	0.3787	0.0137	0.0250	056
3	6	37.50	2.0061	3.098E+4	0.5259	0.0132	0.0238	057
3	7	50.00	2.3405	3.614E+4	0.7013	0.0130	0.0229	058
3	8	65.00	2.6748	4.130E+4	0.9116	0.0129	0.0222	059
3	9	82.00	3.0092	4.647E+4	1.1501	0.0129	0.0216	060
3	10	102.00	3.3436	5.163E+4	1.4306	0.0130	0.0210	061
3	11	122.00	3.6779	5.679E+4	1.7111	0.0128	0.0205	062
3	12	144.00	4.0123	6.195E+4	2.0196	0.0127	0.0201	063

Tabla IV.1 Datos experimentales de la tubería de $\frac{1}{2}$ "

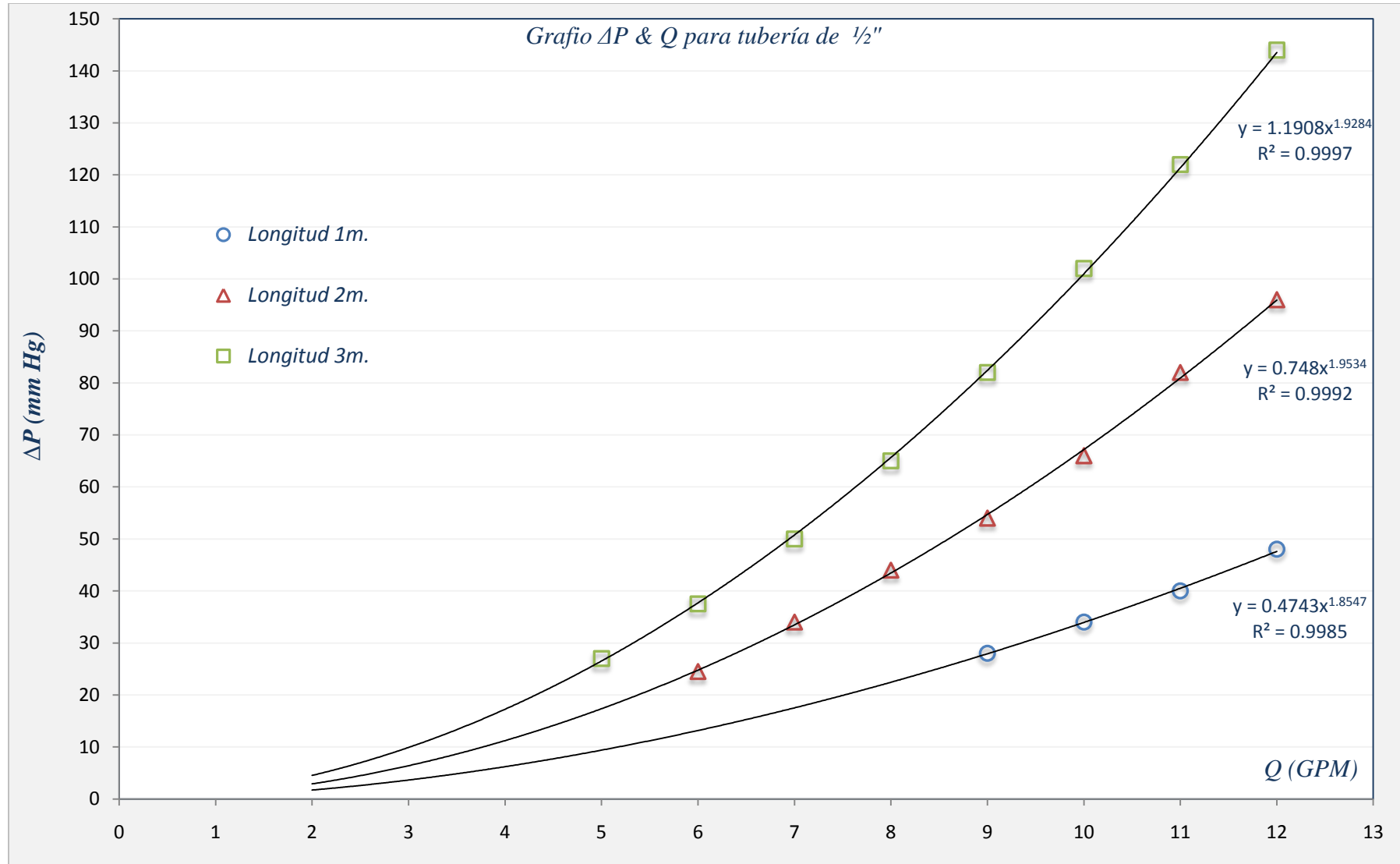


Grafico IV.1 Caídas de presión en tubería de 1/2"

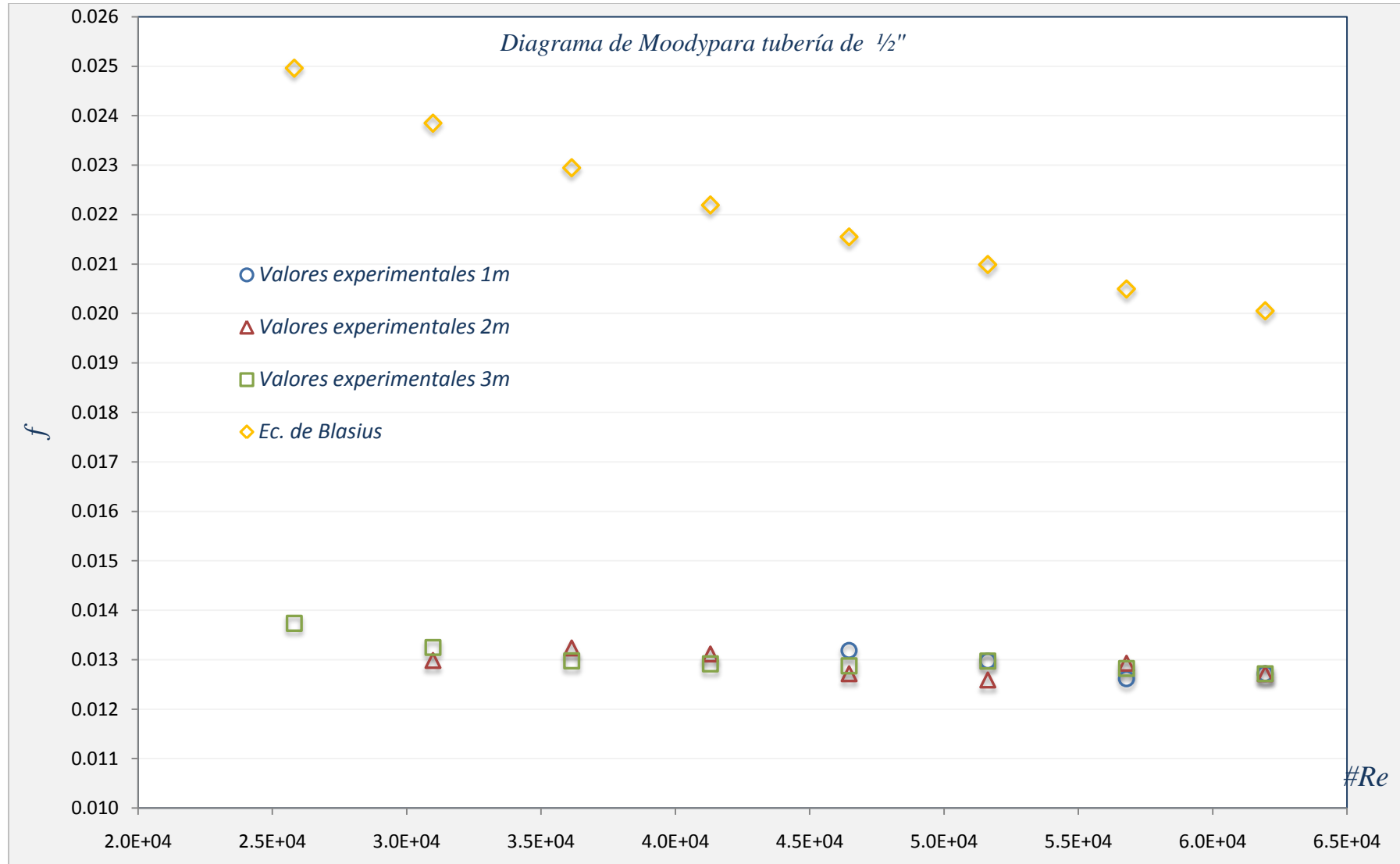


Grafico IV.2 Comparación de los factores de fricción en tubería de 1/2"

IV.2.- Registro de datos experimentales de ΔP , f y $f_{teorico}$ en tubería de $3/4''$

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	Exp
1	9	8.40	1.7036	3.496E+4	0.1178	0.0164	0.0231	005
1	10	10.20	1.8929	3.885E+4	0.1431	0.0161	0.0225	006
1	11	12.40	2.0822	4.273E+4	0.1739	0.0162	0.0220	007
1	12	14.50	2.2715	4.662E+4	0.2034	0.0159	0.0215	008

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
2	6	8.00	1.1358	2.331E+4	0.1122	0.0176	0.0256	028
2	7	10.40	1.3251	2.719E+4	0.1459	0.0168	0.0246	029
2	8	13.40	1.5144	3.108E+4	0.1879	0.0166	0.0238	030
2	9	16.80	1.7036	3.496E+4	0.2356	0.0164	0.0231	031
2	10	20.80	1.8929	3.885E+4	0.2917	0.0165	0.0225	032
2	11	25.50	2.0822	4.273E+4	0.3576	0.0167	0.0220	033
2	12	30.00	2.2715	4.662E+4	0.4208	0.0165	0.0215	034

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
3	5	8.50	0.9465	1.942E+4	0.1192	0.0179	0.0268	064
3	6	12.00	1.1358	2.331E+4	0.1683	0.0176	0.0256	065
3	7	16.00	1.3251	2.719E+4	0.2244	0.0172	0.0246	066
3	8	20.00	1.5144	3.108E+4	0.2805	0.0165	0.0238	067
3	9	25.00	1.7036	3.496E+4	0.3506	0.0163	0.0231	068
3	10	31.00	1.8929	3.885E+4	0.4348	0.0163	0.0225	069
3	11	38.00	2.0822	4.273E+4	0.5330	0.0166	0.0220	070
3	12	44.00	2.2715	4.662E+4	0.6171	0.0161	0.0215	071

Tabla IV.2 Datos experimentales de la tubería de $3/4''$

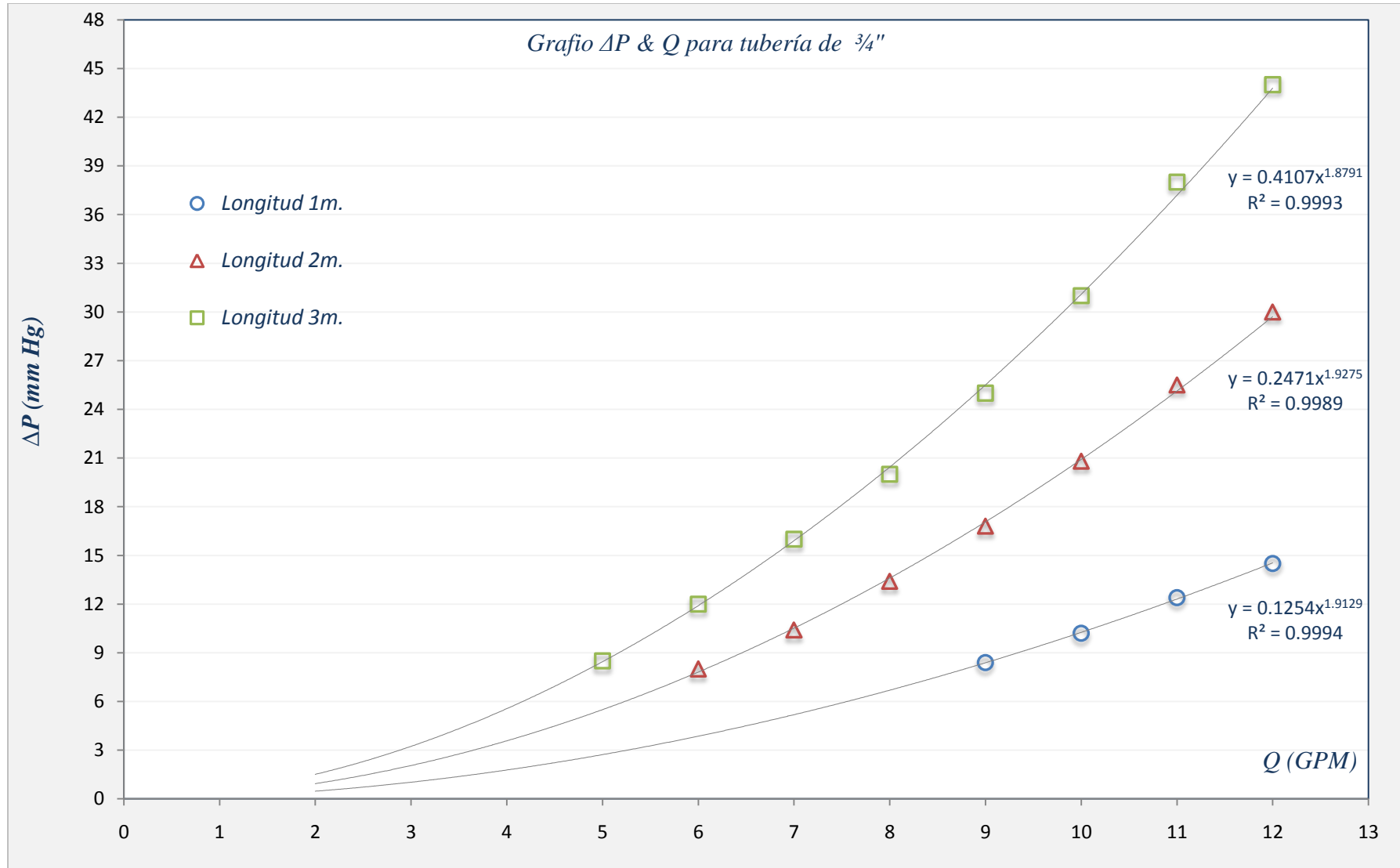
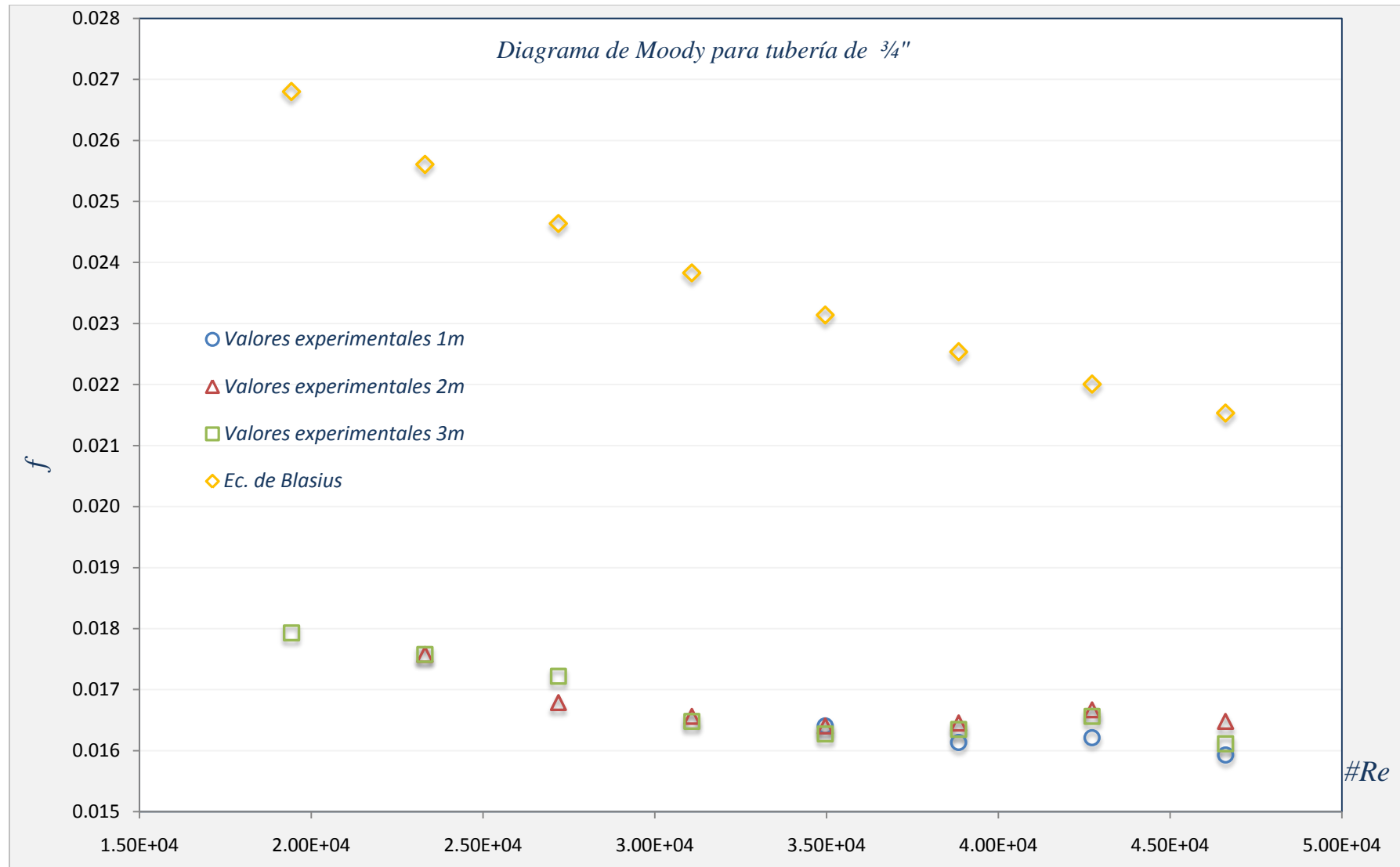


Grafico IV.3 Caídas de presión en tubería de 3/4"

Grafico IV.4 Comparación de los factores de fricción en tubería de $\frac{3}{4}$ "

IV.3.- Registro de datos experimentales de ΔP , f y $f_{teórico}$ en tubería de 1"

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
1	9	3.00	1.0532	2.749E+4	0.0421	0.0195	0.0246	009
1	10	3.60	1.1702	3.054E+4	0.0505	0.0190	0.0239	010
1	11	4.40	1.2872	3.360E+4	0.0617	0.0191	0.0234	011
1	12	5.20	1.4043	3.665E+4	0.0729	0.0190	0.0229	012

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
2	6	3.00	0.7021	1.833E+4	0.0421	0.0219	0.0272	035
2	7	3.80	0.8192	2.138E+4	0.0533	0.0204	0.0262	036
2	8	4.70	0.9362	2.443E+4	0.0659	0.0193	0.0253	037
2	9	6.00	1.0532	2.749E+4	0.0842	0.0195	0.0246	038
2	10	7.40	1.1702	3.054E+4	0.1038	0.0195	0.0239	039
2	11	9.00	1.2872	3.360E+4	0.1262	0.0196	0.0234	040
2	12	10.40	1.4043	3.665E+4	0.1459	0.0190	0.0229	041

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
3	5	3.40	0.5851	1.527E+4	0.0477	0.0239	0.0285	072
3	6	4.50	0.7021	1.833E+4	0.0631	0.0219	0.0272	073
3	7	5.60	0.8192	2.138E+4	0.0785	0.0201	0.0262	074
3	8	7.20	0.9362	2.443E+4	0.1010	0.0197	0.0253	075
3	9	9.00	1.0532	2.749E+4	0.1262	0.0195	0.0246	076
3	10	11.00	1.1702	3.054E+4	0.1543	0.0193	0.0239	077
3	11	13.00	1.2872	3.360E+4	0.1823	0.0189	0.0234	078
3	12	15.50	1.4043	3.665E+4	0.2174	0.0189	0.0229	079

Tabla IV.3 Datos experimentales de la tubería de 1"

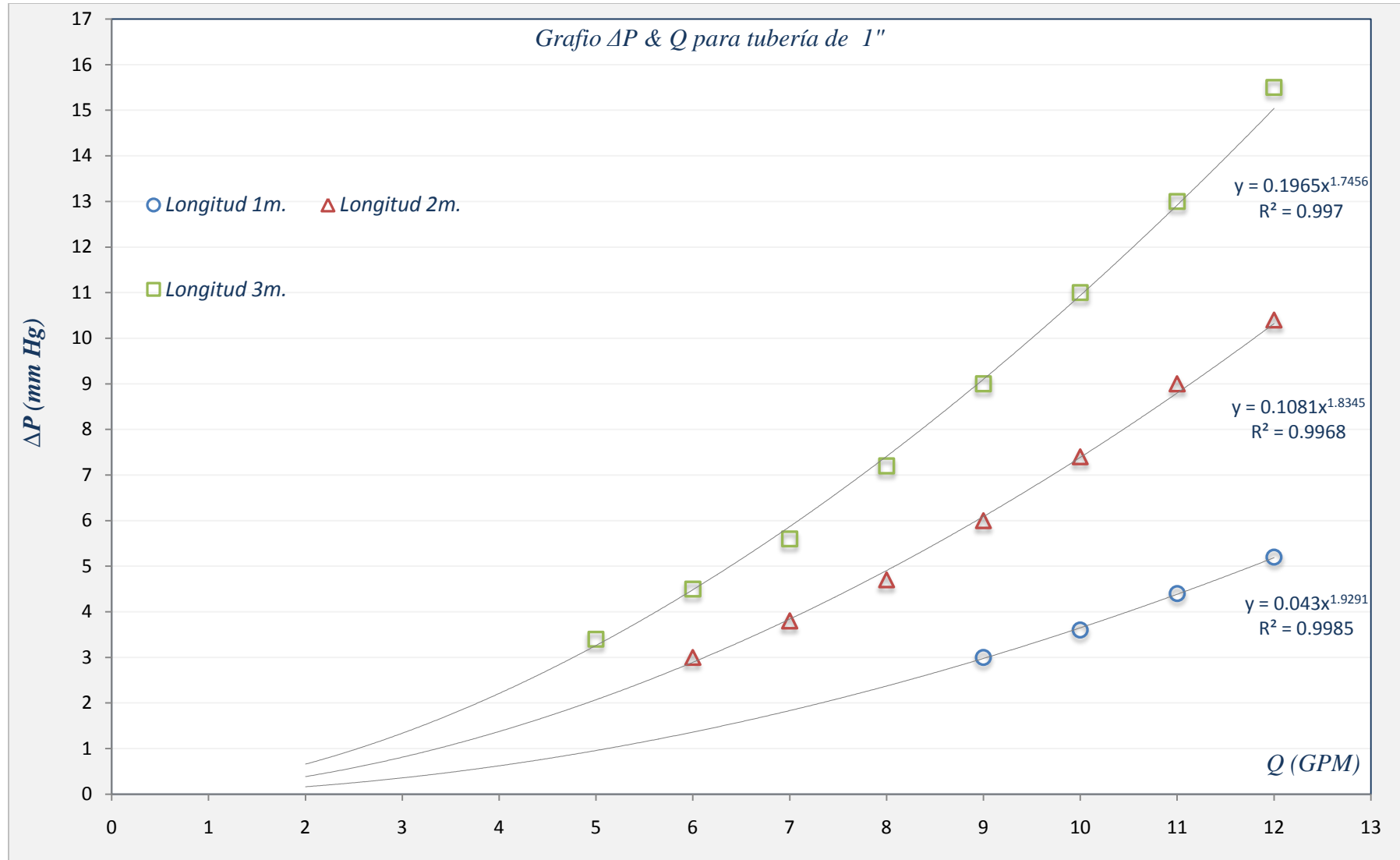


Grafico IV.5 Caídas de presión en tubería de 1"

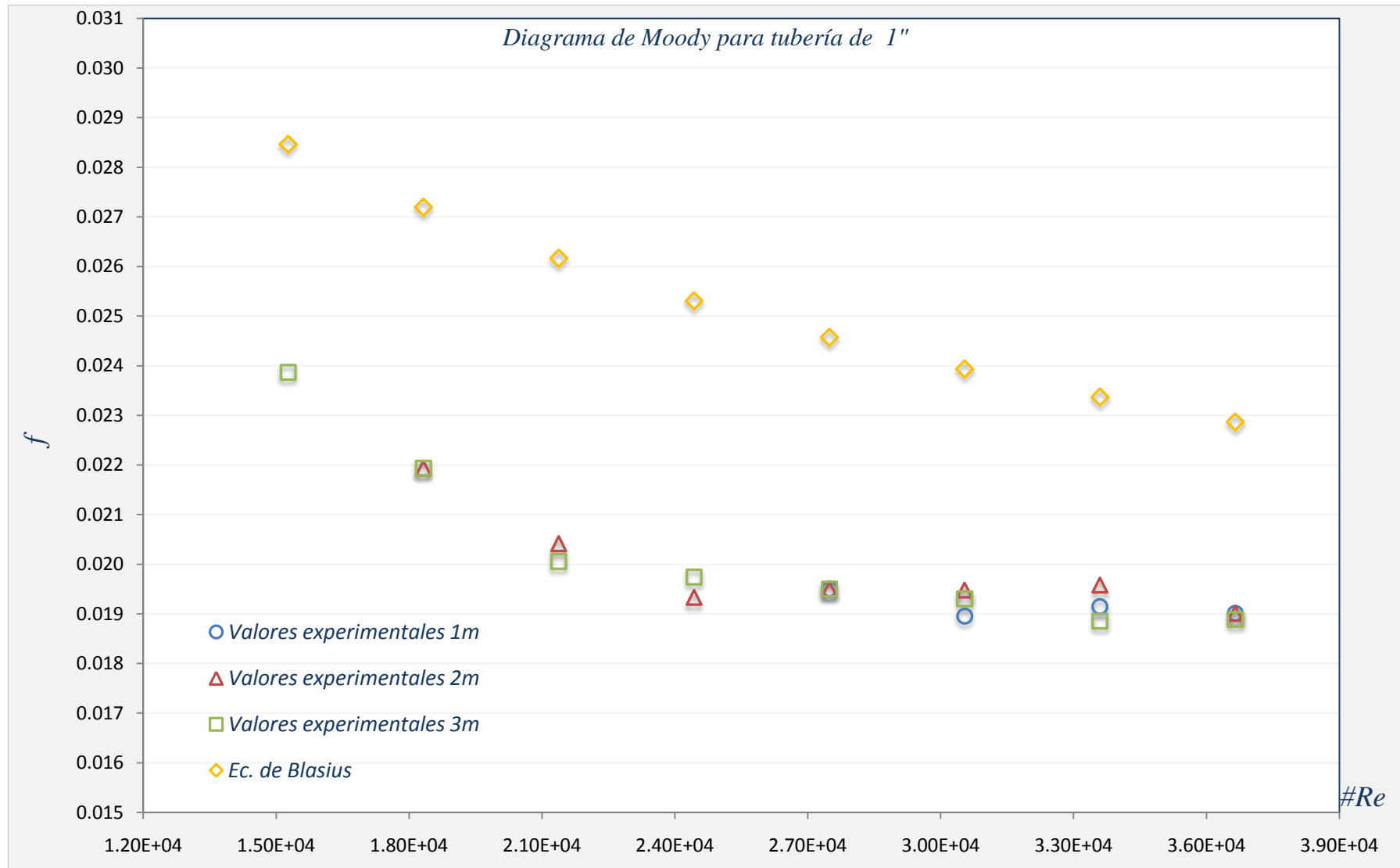


Grafico IV.6 Comparación de los factores de fricción en tubería de 1"

IV.4.- Registro de datos experimentales de ΔP , f y $f_{teorico}$ en tubería de 1¼"

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
1	9	1.00	0.6039	2.082E+4	0.0140	0.0261	0.0263	013
1	10	1.20	0.6710	2.313E+4	0.0168	0.0254	0.0257	014
1	11	1.44	0.7381	2.544E+4	0.0202	0.0252	0.0251	015
1	12	1.70	0.8052	2.775E+4	0.0238	0.0250	0.0245	016

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
2	6	1.00	0.4026	1.388E+4	0.0140	0.0294	0.0292	042
2	7	1.30	0.4697	1.619E+4	0.0182	0.0281	0.0280	043
2	8	1.60	0.5368	1.850E+4	0.0224	0.0264	0.0271	044
2	9	2.00	0.6039	2.082E+4	0.0281	0.0261	0.0263	045
2	10	2.40	0.6710	2.313E+4	0.0337	0.0254	0.0257	046
2	11	2.80	0.7381	2.544E+4	0.0393	0.0245	0.0251	047
2	12	3.40	0.8052	2.775E+4	0.0477	0.0250	0.0245	048

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg \vec{m} /Kg)	f	f teórico	$Exp.$
3	5	1.04	0.3355	1.156E+4	0.0146	0.0293	0.0305	080
3	6	1.50	0.4026	1.388E+4	0.0210	0.0294	0.0292	081
3	7	2.00	0.4697	1.619E+4	0.0281	0.0288	0.0280	082
3	8	2.50	0.5368	1.850E+4	0.0351	0.0275	0.0271	083
3	9	3.00	0.6039	2.082E+4	0.0421	0.0261	0.0263	084
3	10	3.60	0.6710	2.313E+4	0.0505	0.0254	0.0257	085
3	11	4.20	0.7381	2.544E+4	0.0589	0.0245	0.0251	086
3	12	5.00	0.8052	2.775E+4	0.0701	0.0245	0.0245	087

Tabla IV.4 Datos experimentales de la tubería de 1¼"

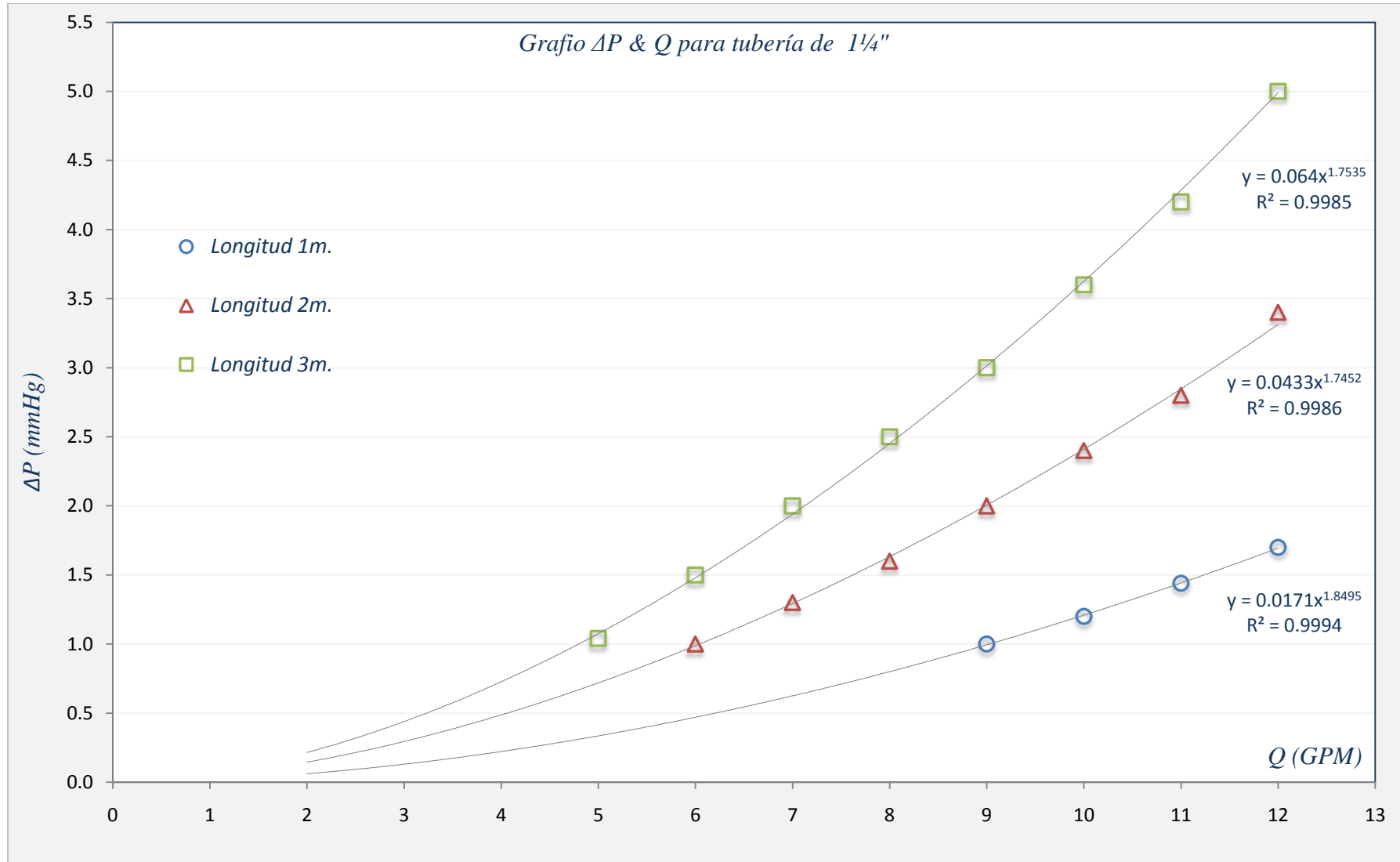


Grafico IV.7 Caída de presión en tubería de 1/4"

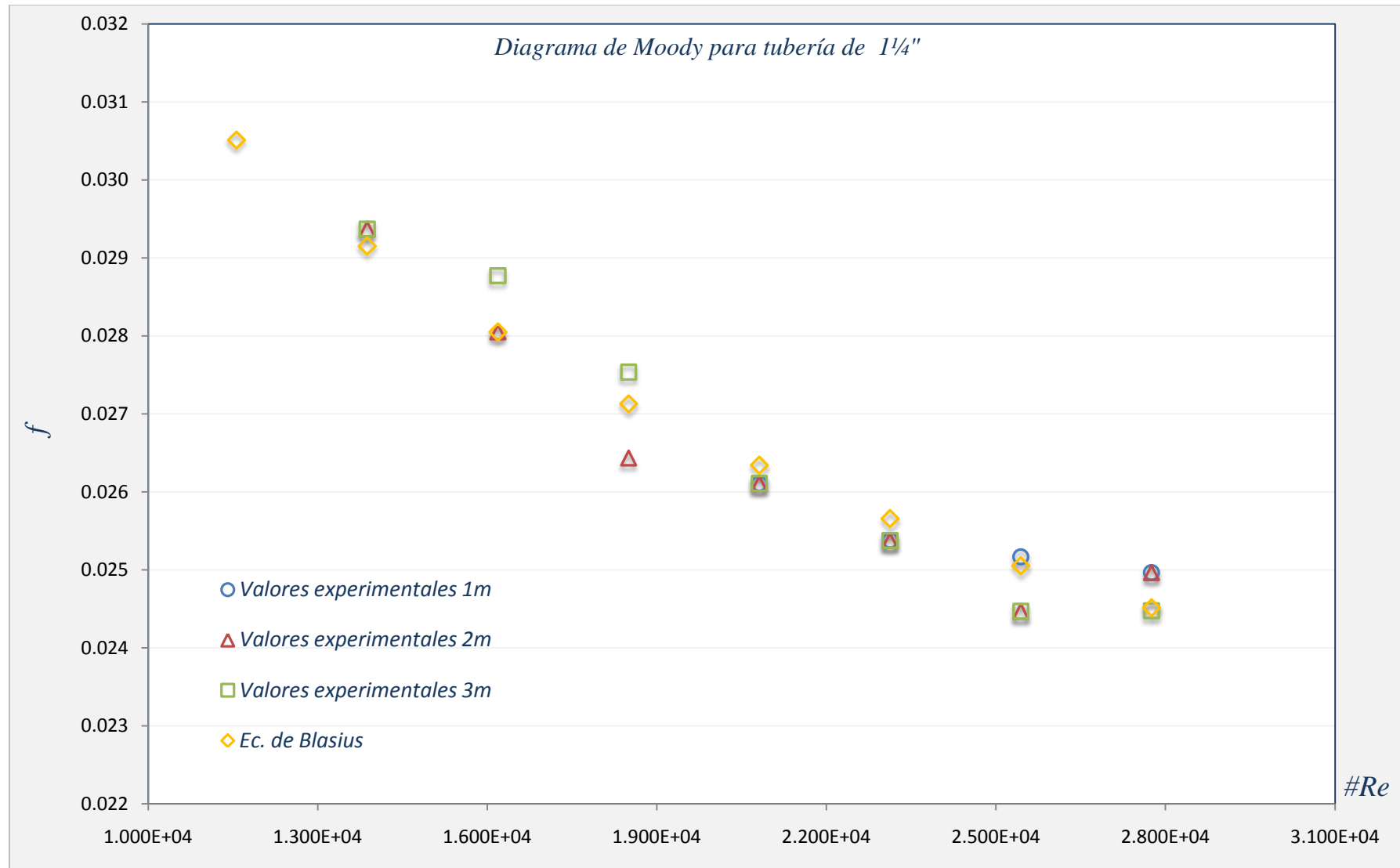


Grafico IV.8 Comparación de los factores de fricción en tubería de 1/4"

IV.5.- Registro de datos experimentales de ΔP , f y $f_{teorico}$ en tubería de 1½"

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻¹ •m/Kg)	f	f teórico	$Exp.$
1	9	0.56	0.4408	1.778E+4	0.0079	0.0321	0.0274	017
1	10	0.66	0.4897	1.976E+4	0.0093	0.0307	0.0267	018
1	11	0.78	0.5387	2.173E+4	0.0109	0.0300	0.0261	019
1	12	0.90	0.5877	2.371E+4	0.0126	0.0290	0.0255	020

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻¹ •m/Kg)	f	f teórico	$Exp.$
2	6	0.56	0.2938	1.186E+4	0.0079	0.0361	0.0303	049
2	7	0.70	0.3428	1.383E+4	0.0098	0.0332	0.0292	050
2	8	0.88	0.3918	1.581E+4	0.0123	0.0319	0.0282	051
2	9	1.10	0.4408	1.778E+4	0.0154	0.0316	0.0274	052
2	10	1.32	0.4897	1.976E+4	0.0185	0.0307	0.0267	053
2	11	1.50	0.5387	2.173E+4	0.0210	0.0288	0.0261	054
2	12	1.80	0.5877	2.371E+4	0.0252	0.0290	0.0255	055

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻¹ •m/Kg)	f	f teórico	$Exp.$
3	5	0.60	0.2449	9.880E+3	0.0084	0.0372	0.0317	089
3	6	0.80	0.2938	1.186E+4	0.0112	0.0344	0.0303	090
3	7	1.00	0.3428	1.383E+4	0.0140	0.0316	0.0292	091
3	8	1.30	0.3918	1.581E+4	0.0182	0.0315	0.0282	092
3	9	1.60	0.4408	1.778E+4	0.0224	0.0306	0.0274	093
3	10	2.00	0.4897	1.976E+4	0.0281	0.0310	0.0267	094
3	11	2.40	0.5387	2.173E+4	0.0337	0.0307	0.0261	095
3	12	2.70	0.5877	2.371E+4	0.0379	0.0290	0.0255	096

Tabla IV.5 Datos experimentales de la tubería de 1½"

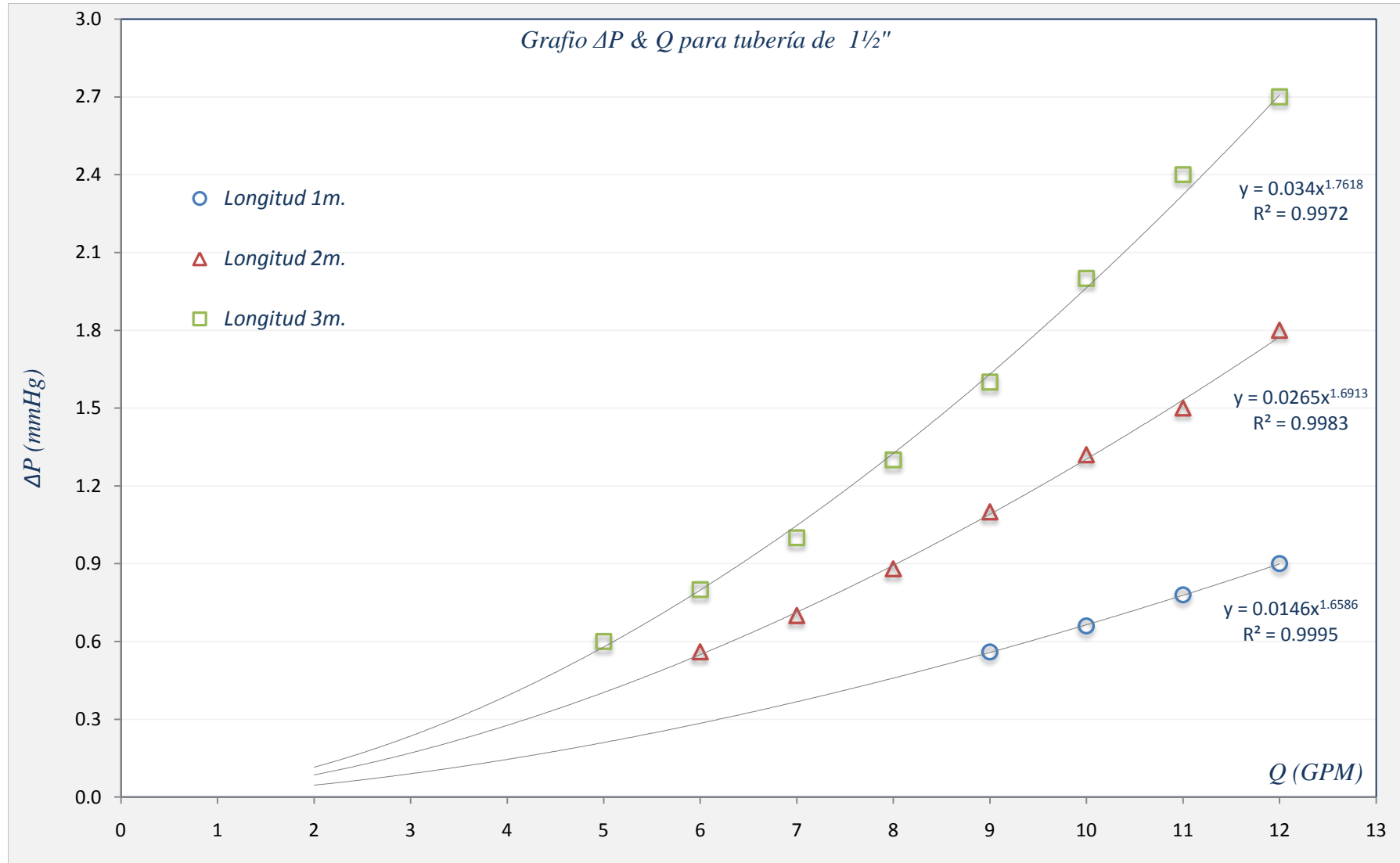


Grafico IV.9 Caída de presión en tubería de 1½"



Grafico IV.10 Comparación de los factores de fricción en tubería de 1½"

IV.6. Diagrama de Moody

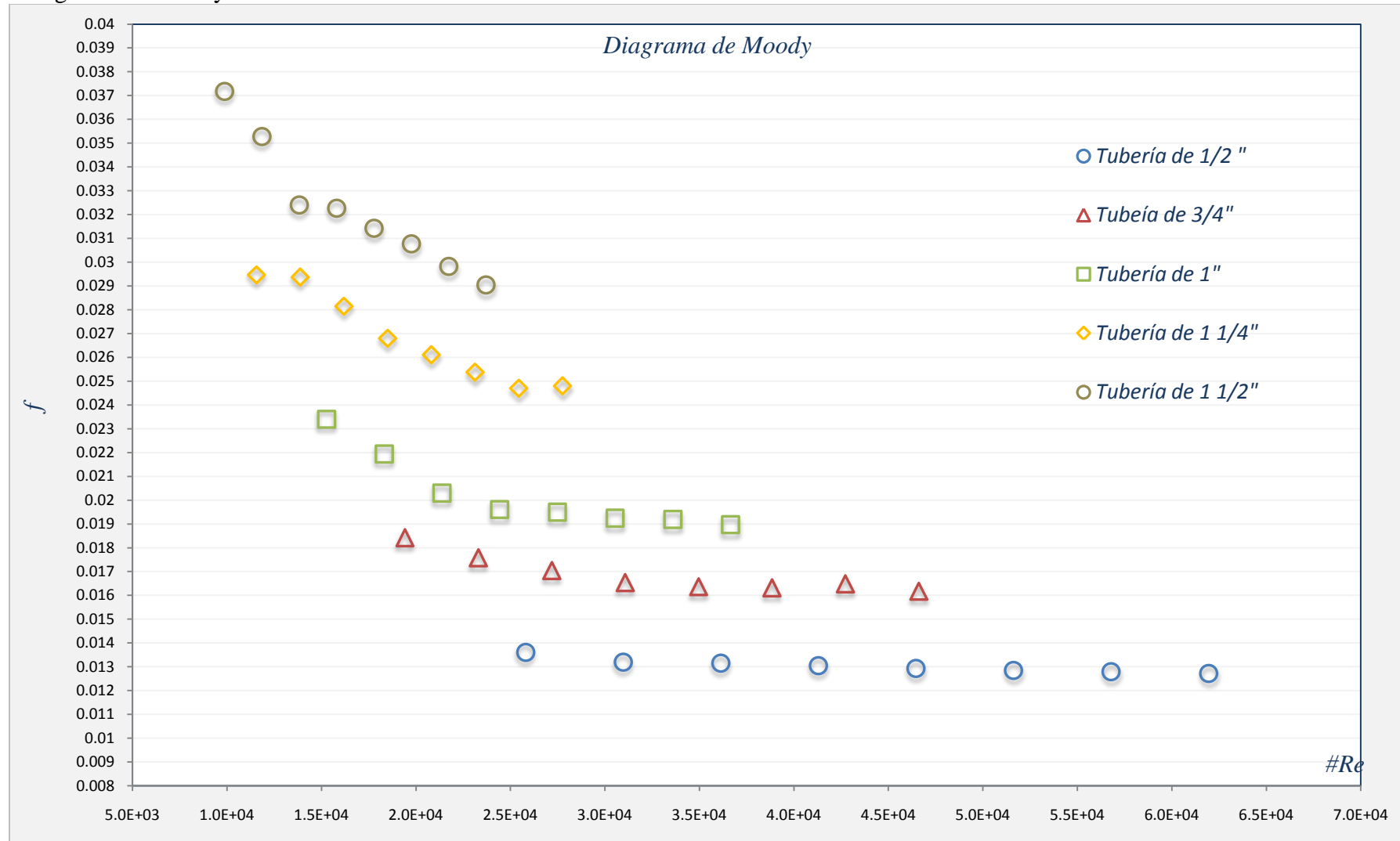


Grafico IV.11 Diagrama De Moody (datos experimentales)

IV.7- Análisis de resultados

Como nos podemos dar cuenta los resultados obtenidos son muy cercanos a los valores reportados en la literatura.

Las graficas de (Q & ΔP) se muestra la correlación potencial aplicada a cada una de las curvas. Dicha correlación en todos los casos es muy cercana a 1.0, lo cual nos indica que las curvas obtenidas en la experimentación son muy precisas y confiables.

Es importante señalar que todas las ecuaciones fueron empleadas para poder determinar cuál fuese la más apropiada para las condiciones con las que se contaba. Solo reportan los resultados obtenidos por la ecuación de Darcy–Weisbach ya que es la ecuación más útil para tuberías lisas.

Las graficas (Q & ΔP) nos muestra que a medida que haya un aumento en el flujo dentro de una tubería lisa la caída de presión aumentara de manera exponencial. Dentro de estas mismas graficas, se puede observar que al aumentar la longitud de la tubería, la caída de presión aumenta.

Mientras que comparando los cinco gráficos (Q & ΔP) podemos observar que aumentando el diámetro de la tubería por donde circule el fluido la caída de presión se verá disminuida.

Las tres relaciones (D & ΔP), (Q & ΔP) y (L & ΔP) también se puede observar el mismo comportamiento en los diagramas de Moody. En el caso de la longitud es evidente ya que para cada longitud existe una curva. El ΔP lo podemos determinar de forma indirecta por medio del factor de fricción y el flujo por medio del número de Reynolds. Mientras que el comportamiento la relación (D & ΔP) lo podemos apreciar en el diagrama de Moody (*grafico IV.11*), el cual se realizó con los diferentes diámetros de tubería.

En los diagramas de Moody, los valores experimentales obtenidos con la ecuación de Darcy–Weisbach con los valores teóricos de la ecuación de Blasius se pueden apreciar la semejanza que existe entre ambas ecuaciones en relación de la tendencia y los valores numéricos. Esto no también nos indica que ambas ecuaciones son validas para tuberías lisas y régimen de flujo turbulento.

Es evidente que los valores obtenidos no son idénticos a los resultados teóricos ya que se pueden considerar diferentes factores que no permitieran su reproducción exacta, como lo puede ser:

- Los rotámetros son otro de los factores que pudieran ser causa de un mayor margen de error. Ya que es muy difícil lograr su estabilidad la momento de las lecturas.
- El manómetro en “U”, ya que las presiones que resultan del experimento son presiones bajas y el manómetro no es un instrumento que nos ayude a poder determinar dichas presiones.
- Las dimensiones físicas con que cuenta el equipó de tuberías lisas, ya que el equipo cuenta con una longitud no mayor a tres metros y una de las restricciones de la ecuación es que su margen de error aumenta con la disminución de la longitud. Algunos autores recomiendan una longitud mínima de cinco a seis metros para que pueda aplicarse dicha fórmula.

CAPITULO V

PROPUESTA DE PROTOCOLO EXPERIMENTAL


V. PROPUESTA DE PROTOCOLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se hablara detalladamente de la propuesta de protocolo y de la realización de la práctica de perdidas por fricción en tuberías lisas.

Dicha propuesta se presenta en el formato ya establecido para todas las prácticas experimentales de la carrera de Ingeniería Química de la FES Zaragoza.

El protocolo experimental que se propone está basado a los diferentes objetivos que tiene dicha práctica, los cuales nos permiten realizar un análisis y un mayor entendimiento de los fenómenos que implican los flujos de fluidos.

A continuación se explicara de qué forma se desarrollará la práctica, y ya que el equipo de cierta manera es nuevo, se explicara de qué forma se debe operar y de igual manera la limpieza o mantenimiento que se le debe realizar al mismo.

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

Título			Fecha de aprobación:	
DETERMINACIÓN DE CAIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN				
RESPONSABLE # CONTROL	Departamento Emisor Jefatura de Ingeniería Química.	Autorizo:	Reviso:	Elaboro:
Departamentos relacionados:		Documentos relacionados:		
Todos los Departamentos		- PROCEDIMIENTOS		
		- INSTRUCCIONES DE TRABAJO		

Contenido


Concepto	Página
1. Propósito	3
2. Alcance	3
3. Definición	3
4. Material y Procedimiento	7
5. Tratamiento de datos	11

Columna de actualización.

Historial revisión	Fecha de revisión	Descripción del cambio	Elaboro	Aprobó

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES “ZARAGOZA”	Código PR -IQ-000
	<u>PROCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

Titulo			Fecha
Grupo:	Equipo:	Profesor:	Calificación:
Alumnos:			

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES “ZARAGOZA”	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERÍA QUÍMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA POR FRICCIÓN

1. PROPÓSITO

- Determinar experimentalmente la pérdida de energía de un fluido que pasa a través de una tubería lisa variando el diámetro y el flujo circulante.
- Calcular la magnitud de la pérdida de energía para un flujo laminar o para uno turbulento.
- Reconocer las fuentes de pérdidas menores.
- Construir el diagrama de Moody (Re & f)
- Graficar las curvas experimentales de Q & ΔP para los diferentes longitudes y diámetros de tubería.

2. ALCANCE

Esta práctica es aplicable al laboratorio de taller de proyectos, para los alumnos de sexto semestre de la carrera de Ingeniería Química. La cual se realizara en la planta piloto de Ingeniería Química.

3. DEFINICIÓN

Las pérdidas por fricción se derivan en las pérdidas lineales y las pérdidas singulares. Cada una de ellas se encuentra en función de diferentes factores.

Las pérdidas lineales (h_{pl}) son las pérdidas originadas por las fuerzas viscosas por la iteración del fluido en estudio y el sistema que lo contenga.

A régimen laminar los esfuerzos cortantes se pueden calcular de forma analítica por medio de la ecuación de Hagen–Poiseuille.

$$h_{pl} = \frac{32\mu Lu}{g_c \rho D^2} \quad (1)$$

donde:

h_{pl} = perdidas lineales

μ = viscosidad del fluidos


L = longitud de la tubería

u = velocidad promedio del fluido

ρ = densidad del fluido

D = diámetro de la tubería

g_c = constante gravitacional

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES “ZARAGOZA”	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

Mientras que a régimen turbulento el cálculo no se puede realizar de forma analítica ya que las pérdidas de carga dependen de la tensión de corte de la pared y las relacionamos con las demás variables:

$$\tau_w = f u, D, \varepsilon, \mu, \rho \quad (2)$$

donde:

τ_w = tensión de corte

μ = viscosidad del fluidos

u = velocidad promedio del fluido

ρ = densidad del fluido

D = diámetro de la tubería

ε = rugosidad de la tubería

Por lo tanto el cálculo se tiene que realizar por medio de la ecuación de Darcy–Weisbach

$$h_{pl} = f \frac{Lu^2}{2g_c D} = \frac{8fLQ^2}{g_c D^5 \pi^2} \quad (3)$$

donde:

h_{pl} = perdidas lineales

f = factor de fricción

L = longitud de la tubería

u = velocidad promedio del fluido


D = diámetro de la tubería

g_c = constante gravitacional

Q = caudal volumétrico

Las perdidas singulares (h_{ps}) son las pérdidas originadas por una mayor o menor obstrucción del flujo, es decir; todos los accesorios y desviaciones de flujo con que cuente el sistema.

$$h_{ps} = \zeta \frac{u^2}{2g_c} = \frac{8\zeta}{g\pi^2 D^4} \quad (4)$$

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

donde:

h_{ps} = pérdidas singulares

ξ = coeficiente de pérdidas singulares

u = velocidad promedio del fluido

D = diámetro de la tubería

g_c = constante gravitacional

Las pérdidas totales por fricción se calcular por medio de tres métodos:

- Método de las longitudes equivalentes.- Se estima las pérdidas que tiene el accesorio suponiendo que este fuese un tramo de tubería recto (L/D), el cual debe producir el mismo efecto de pérdidas por fricción.

$$L_T = L_{eq} + L_{tr} \quad (5)$$

L_T = longitud total de la tubería

L_{eq} = longitud equivalente de los accesorios

L_{tr} = longitud de tramo recto

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (3) obtenemos:

$$H_{ft} = f \frac{L_T}{D} \left(\frac{u^2}{2g_c} \right) \quad (6)$$

donde:

H_{ft} = pérdidas totales

f = factor de fricción


L_T = longitud equivalente total

u = velocidad promedio del fluido

D = diámetro de la tubería

g_c = constante gravitacional

- Método de las K's.- El coeficiente de pérdidas K se define como la pérdida de la altura de velocidad. Se evalúa el coeficiente de carga de cada accesorio y la cantidad de cada uno de ellos presente en el sistema de flujo. Tomando en cuenta que en la mayoría de los accesorios las pérdidas por fricción a lo largo de la longitud real de flujo son mínimas por ello el coeficiente de pérdidas K se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds.

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

$$H_{ft} = \frac{K_T u^2}{2g_c} \quad (7)$$

donde:

H_{ft} = pérdidas totales

K_T = coeficiente de pérdidas totales

u = velocidad promedio del fluido

D = diámetro de la tubería

g_c = constante gravitacional

- Método simplificado.- Ya que la fricción representa una pérdida de energía, puede considerarse como una caída de presión del fluido, obtenida experimentalmente. Y dividiendo esta caída de presión entre la densidad del fluido se obtiene:


$$H_{ft} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (8)$$

donde:

H_{ft} = pérdidas totales

ΔP = perdidas de presión

ρ = densidad del fluido

 <p>UNAM FES ZARAGOZA</p>	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"</p> <p><u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.</p>	<p>Código</p> <p>PR -IQ-000</p>
		<p>Revisión</p>

4. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO

MATERIAL

- Un termómetro de mercurio (-20 a 80 °C)

REACTIVOS

En ésta actividad no se utilizan reactivos

HERRAMIENTA

En ésta actividad no se utilizan herramientas.

EQUIPO

- Equipo de flujo de fluidos de tuberías lisas (PVC).
- Una cubeta.
- Una jícara
- Una jeringa de 5ml.

SERVICIOS


- Agua
- Corriente eléctrica

PROCEDIMIENTO.

Las siguientes instrucciones deben seguirse cuidadosamente para garantizar la calidad de las pruebas, el buen funcionamiento del equipo y la seguridad en la planta piloto.

Recomendaciones

1. Verificar que el tanque TA-01 de agua se encuentre con un nivel aproximadamente 60cm por encima de la línea de succión de la bomba.
2. Revisar que el agua que contenga el tanque TA-01 del equipo se encuentre limpia, sino es así se deberá de drenar el tanque por medio de la válvula #1 (en caso de drenar el tanque es necesario desplazar el equipo de tal manera que la válvula de drene desemboque en el alcantarillado), para posteriormente realizar el llenado de tanque con agua limpia.


 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES “ZARAGOZA”	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

3. Introducir el termómetro en el fluido para poder determinar la temperatura la cual nos ayudara a conocer la densidad del fluido.
4. Abrir todas las válvulas excepto la válvula #6.
5. Verificar que las mangueras del manómetro no se encuentren conectadas a ninguna válvula de toma de muestra.
6. Conectar el equipo a la toma de corriente y encenderlo mediante el interruptor ON-OFF. El equipo se deberá mantenerlo encendido durante un tiempo aproximado de 2 min. Esto para poder verificar que la tubería se encuentre en buen estado (no presente fugas) y poder comprobar la limpieza del equipo.

Operación

1. Colocar las mangueras para la medición de la presión diferencial en las tomas de presión seleccionada, se deberá cerrar las válvulas de las líneas que no intervengan en la medición de la presión diferencial. Por ejemplo, si se desea tener la medición de la presión en la tubería de ½ in. es necesario cerrar las válvulas #6 y de la válvula #9 a la #23.
2. Las válvulas #3, 4, 5 (válvulas controladoras de los rotámetros) se abrirán o cerraran dependiendo del flujo seleccionado.
3. Todas las válvulas de toma de muestra se deberán verificar que se encuentren cerradas.
4. Encender la bomba por medio del interruptor ON-OFF.
5. Abrir la válvula #9 gradual mente para poder eliminar el aire atrapado en la tubería, (válvula de desfogue).
6. Fijar el flujo al cual se desee trabajar, (válvulas #3, 4, 5).
7. Una vez que la tubería se encuentra inundada por el fluido se prosigue a introducir las mangueras en las válvulas de toma de muestra, para posteriormente ir abriéndolas gradualmente. En el caso del ejemplo anterior (a una longitud de 3 m), serian las válvulas #1a) y #1d) que nos ayudara a eliminar el aire atrapado en las mangueras.
8. Se debe de realizar un llenado del manómetro ya que al momento en que se da el cambio de presión, el nivel de mercurio provoca un déficit de agua. Lo cual si no verificamos antes de realizar la medición interferirá con los resultados.

Por lo tanto dicho llenado se realizara de la siguiente manera: la jeringa de 5ml será llenada con agua para después abrir las válvulas #8a) y #8b). Se introduce la jeringa en

 <p>UNAM FES ZARAGOZA</p>	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES “ZARAGOZA”</p> <p><u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.</p>	<p>Código</p> <p>PR -IQ-000</p>
		<p>Revisión</p>

las válvulas 8a) y 8b) y se inyectara el agua de forma gradual, hasta derramarse. Para después cerrar dichas válvulas.

9. Después de haber eliminado el aire de las mangueras y de haber llenado el manómetro con agua se prosigue con la conexión de las mangueras al manómetro. Dicha operación se debe de realizar siempre y cuando las válvulas #8a) y #8b) se encuentren cerradas.
10. Se abrirán las válvulas de toma de muestra que se estén utilizando.
11. Se recomienda dejar trabajar el quipo por uno o dos minutos antes de empezar a tomar datos ya que es necesario la estabilización del flujo.
12. Se comenzará con la lectura de las caídas de presión en la tubería que se haya seleccionar. Esto se realizara abriendo las válvulas #8a) y #8b).
13. Para poder tener resultados precisos se recomienda que el rotámetro sea observado por un alumno (el cual verifique su estabilidad), mientras que otro alumno se encargue de la toma de datos del manómetro.
14. Para poder realizar otra toma de muestra se deben abrir las válvulas de la línea a utilizar, y posteriormente se cierran las válvulas de la línea que fue utilizada.
15. Volver a realizar todos los pasos antes mencionados.
16. Al terminar la practica se debe de apagar la bomba GA-01 por medio del interruptor ON-OFF.
17. Abrir todas las válvulas excepto las válvulas #VG-2 y #7a). Esto se realiza para poder limpiar el equipo.
18. Por ultimo para poder drenar los rotámetros se debe de abrir la válvula #7a).

En la siguiente figura se muestra el equipo de flujo con la numeración que se le asigna a cada una de las válvulas.

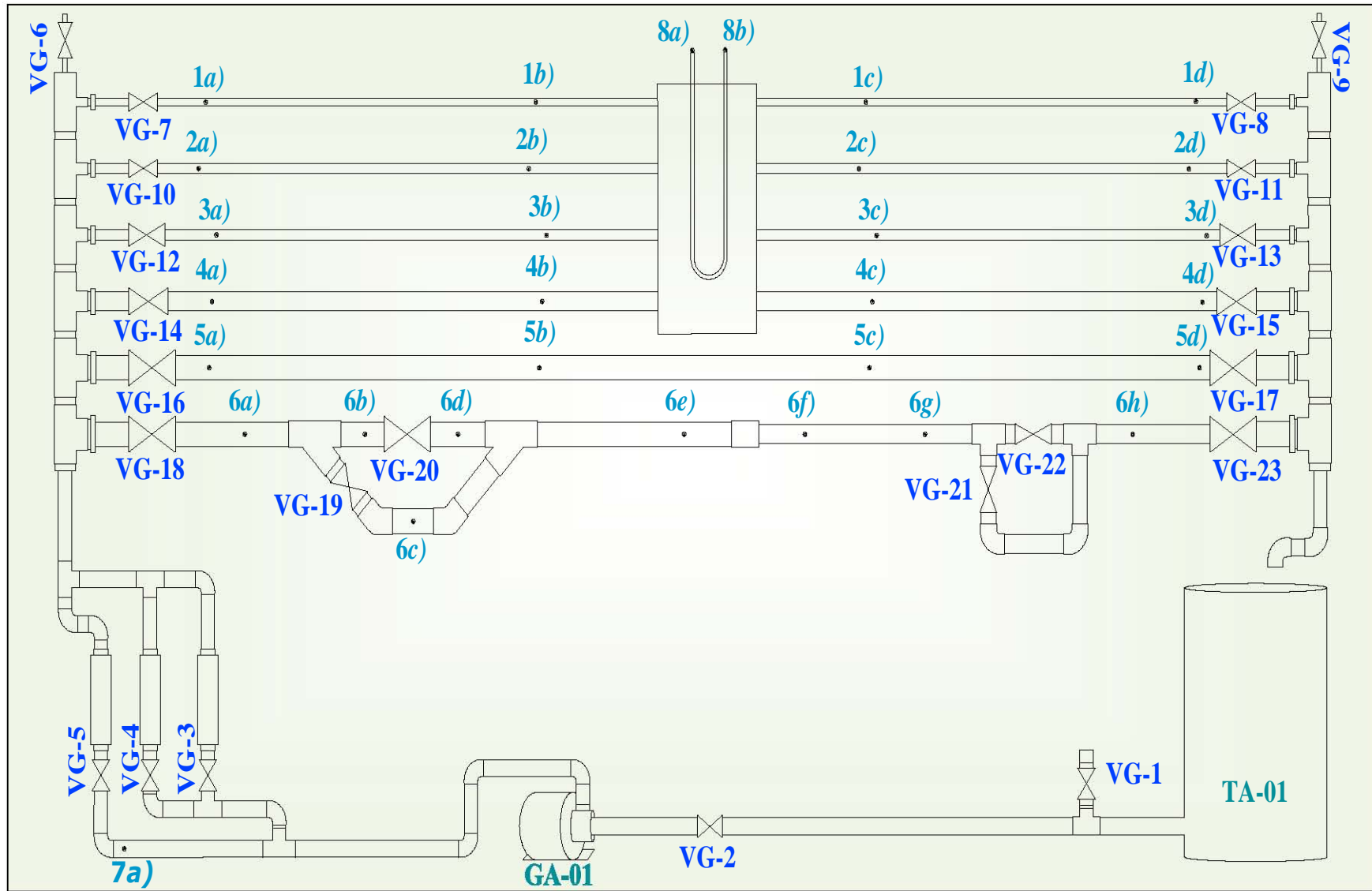



Figura 1.-Equipo de tuberías Lisas (nomenclatura de válvulas)

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES “ZARAGOZA”	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

5. TRATAMIENTO DE DATOS

Se debe realizar las siguientes tablas de presentación de datos.

Tubería ½”								
Q (GPM)	L (m)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻² •m/Kg)	f	f teórico	Exp

Tabla 1.- Registro datos de la tubería de ½”

Tubería ¾”								
Q (GPM)	L (m)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻² •m/Kg)	f	f teórico	Exp

Tabla 2.- Registro datos de la tubería de ¾”

Tubería 1”								
Q (GPM)	L (m)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻² •m/Kg)	f	f teórico	Exp

Tabla 3.- Registro datos de la tubería de 1”

Tubería 1 ½”								
Q (GPM)	L (m)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻² •m/Kg)	f	f teórico	Exp

Tabla 4.- Registro datos de la tubería de 1 ¼”

Tubería 1 ¾”								
Q (GPM)	L (m)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	$(\Delta P/\rho)$ (Kg ⁻² •m/Kg)	f	f teórico	Exp

Tabla 5.- Registro datos de la tubería de 1 ½”

PROTOCOLO
 INGENIERIA QUIMICA
 Análisis de un sistema de tuberías lisas.

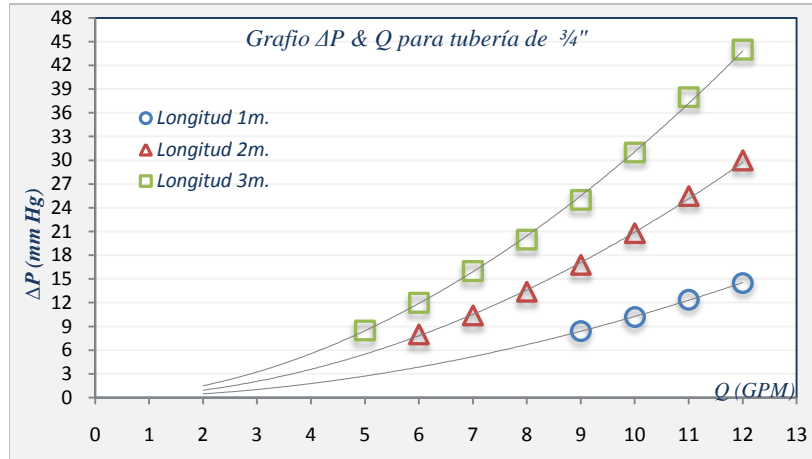


Grafico 1.- Variación de la caída de presión con respecto al cambio de flujo (Agregando regresión potencial).

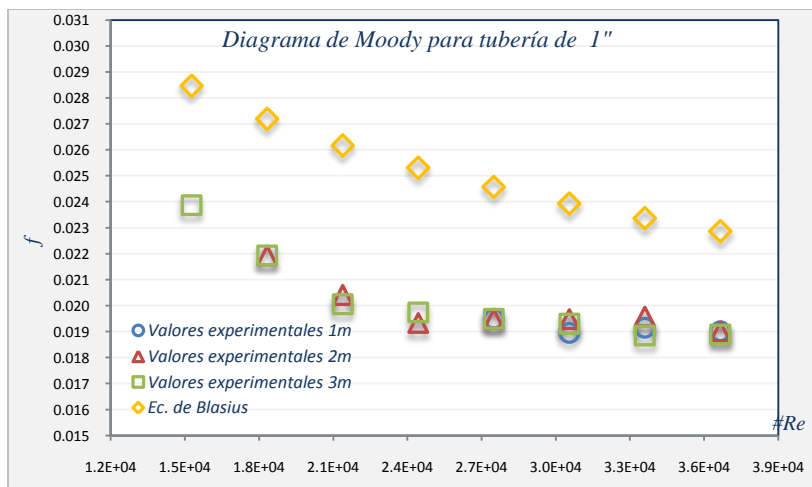


Grafico 2.- Diagrama de Moody para cada diámetro de tubería.

 UNAM FES ZARAGOZA	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"	Código PR -IQ-000
	<u>PROTOCOLO</u> INGENIERIA QUIMICA Análisis de un sistema de tuberías lisas.	Revisión

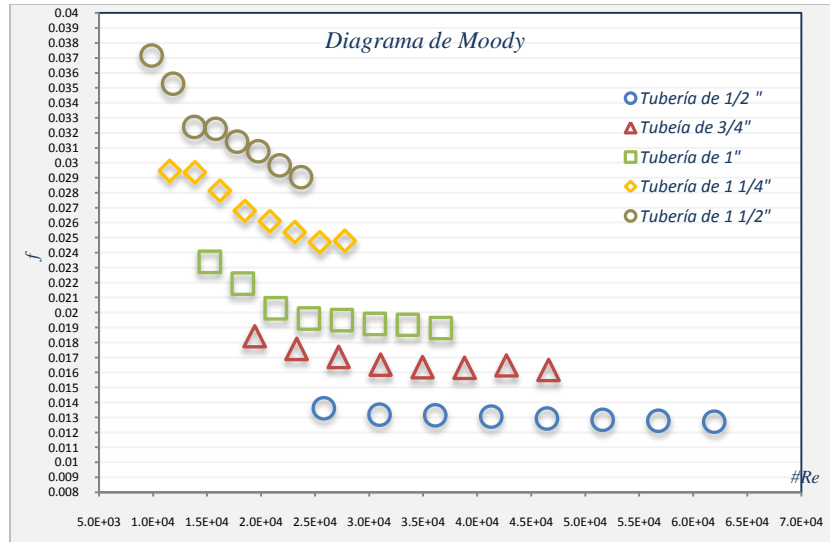


Grafico 3.- Diagrama de Moody (graficando todos los diámetros de tubería).

INFORME

El informe de la práctica desarrollada debe contener los siguientes aspectos:

1. Hoja de presentación
2. Marco Teórico
3. Resultados
4. Análisis de datos:
 - Ecuaciones utilizadas en los cálculos de las pérdidas por fricción.
 - Curvas obtenidas de factor de fricción teórica vs. Número de Reynolds y factor de fricción experimental vs. Número de Reynolds.
5. Conclusiones
6. Bibliografía

CONCLUSIONES

La elaboración del protocolo experimental “Análisis de un sistema de tuberías lisas” (para el equipo de tuberías lisas de PVC, el cual se encuentra dentro de las instalaciones de la planta piloto de la FES Zaragoza), se desarrolló satisfactoriamente integrando dentro del mismo la relación de la caída de presión a diferentes longitudes, diámetros y flujos.

Tomando en cuenta los conceptos y fundamentos incluidos dentro de este trabajo de tesis se pudo obtener una mejor comprensión de la mecánica de fluidos para los alumnos. Además que permite tener mayor interés en los problemas de flujo de fluidos implicados dentro de la carrera de Ingeniería Química.

El comportamiento del fluido se pudo observar por medio de las graficas obtenidas en la parte experimental. Este comportamiento pudo ser observado por medio de ecuaciones o diagramas teóricos, pero realizándolo de forma experimental podemos ver en específico el efecto que tienen las ecuaciones en el equipo de tuberías lisas en particular.

Analizando los resultados que nos arrojó la experimentación, es importante destacar los factores que nos evitan tener una reproducción mas exacta de los valores teóricos. Estos factores que limitan la mejora y reproducción de los resultados son: la elección del manómetro en U, los rotámetros y la elección de la bomba.

La elección del manómetro en U no es quizá el accesorio de medición de presión más apropiado para dicho sistema, ya que los valores que se obtuvieron son muy pequeños y por lo tanto, este genera errores de lectura debido a la graduación con que cuenta.

De igual manera se podría evitar dicho error aumentando la potencia de la bomba, para así obtener mayores caídas de presión que puedan ser medibles con una menor dificultad. Además de que uno de los rotámetros empleados (1 *GPM*) tendría que ser remplazado ya que no sería útil para poder obtener dichas caídas de presión.

Esta modificación también nos ayudaría a realizar desarrollar una más exacta y completa del rotámetro de 50 *GPM*, puesto debido a que el flujo máximo que puede desarrollar la bomba es de, 14 *GPM* la calibración del rotámetro solo se desarrollo con los primeros tres valores.

Otro factor que es importante considerar es la longitud total con que cuenta el equipo de tuberías lisas PVC. En cuestión de la longitud total del mismo así como, de la distancia a la que se encuentran situadas las válvulas de toma de muestra, ya que las primeras se podrían encontrar situadas antes de que el régimen del flujo se encuentre totalmente desarrollado y por lo tanto esto afecta los valores obtenidos.

Por todo lo anterior se recomienda:

El cambio del manómetro en U por un manómetro en U inclinado (*Dwyer 400*) o mejor aún, un manómetro electrónico (*Mc Leod ABB 691 HT*) el cual nos daría mediciones más exactas.

En el caso del rotámetro de 0 a 1 *GPM* se recomienda cambiarlo por un rotámetro de 1 a 20 *GPM*. El cual nos permitirá tener una medición del flujo más controlada y un margen de error más pequeño comparado con el rotámetro de 50 *GPM*.

De igual manera, se recomienda el aumento de potencia en el equipo de bombeo o en su defecto el cambio por una bomba de $\frac{3}{4}$ hp.

Para la medición en diámetros mayores a $\frac{3}{4}$ ":

La medición en las longitudes de 1m se tiene que realizar en la última sección de la línea, es decir, de la válvula de toma de muestra 3 a la 4.

Para la medición en las longitudes de 2m se tiene que realizar de la válvula de toma 2 a la 4.

Y en el caso de las mediciones en las longitudes de 3m no se puede garantizar la reproducción del experimento en ninguna tubería ya que no se puede obtener un flujo totalmente desarrollado.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

- 1) Bennett C. O.; Myers J. E., "Momentum, heat and mass transfer", (3ª edición), McGraw-Hill, New York, 1978.
- 2) Bird R. B., Stewart W. E. "Fenómenos de transporte", Editorial. Reverte, Barcelona, 1992.
- 3) Crane, "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías", McGraw Hill, México, 1989.
- 4) Dondé Castro Mario, "Transporte de momentum y calor. Teoría aplicada a la ingeniería de procesos", Publicado por Universidad Autónoma de Yucatán. México, 2005.
- 5) Douglas J. F.; Glosiorak J. M.; Swaffiela J. A., "Fluid mechanics", Pitman Publishing Limited, London, 1970.
- 6) Fox, W. Robert; McDonald, A.T., "Introducción a la mecánica de fluidos", (2ª edición), McGraw-Hill, 1995.
- 7) Geankoplis Christie J., "Procesos de transporte y operaciones unitarias", (3ª edición), CECSA, México, 1998.
- 8) Giles Ronald V.; Moneva Jaime Moneva, "Mecánica de fluidos e hidráulica", McGraw-Hill, México, 1992.
- 9) Holland A. F., "Flujo de fluidos para ingenieros químicos". Chemical Publishing Co., USA, 1973.
- 10) Hughes William F., "Dinámica de fluidos", McGraw-Hill, México, 1987.
- 11) Marigorta Blanco, E.; Velarde Suárez, S; Fernández Francos, J., "Sistemas de bombeo", Universidad de Oviedo. Gijón, 1994.
- 12) Mataix, Claudio "Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas" (2ª edición), Ediciones del Castillo S. A. de C. V. Madrid, 1986.
- 13) Mott Robert L., "Mecánica de fluidos aplicada", (4ª edición), Prentice-Hall hispanoamericana, S.A. México, 1996.
- 14) Perry John H., "Manual del ingeniero químico", McGraw-Hill, México, D.F., 1996.
- 15) Shames, I. H. "La mecánica de los fluidos", (3ª edición), McGraw-Hill, Colombia, 1995.
- 16) Sissom L. E., "Elements of transport phenomena", Mc Graw Hill, Japon, 1972
- 17) Sotelo Avila Gilberto, "Hidráulica general", Editorial Limusa S.A. de C.V. México, 1997

- 18) Streeter Victor L., E. Benjamin Wylie “Mecánica de los fluidos” (8ª edición), McGraw-Hill, México, 1996.
- 19) Streeter, E.B.; Wylie, E.B. “Mecánica de los fluidos”, McGraw-Hill, 1998.
- 20) Vernnard John K.; Street Robert L., “Elementos de mecánica de fluidos”, editorial Continental, México, 1985
- 21) White, M. F. “Mecánica de Fluidos”, (5ª edición) McGraw-Hill, 2003.

REFERENCIAS ARTÍCULOS

- 22) Martínez de la Calle, Julián. Ballesteros Tajadura, Rafael.; “Flujo viscoso en conductos”, Universidad de Oviedo, España 2004.

REFERENCIAS TESIS

- 23) Fortanel Montiel Juan Carlos. “Diseño y construcción de un equipó para la determinación del factor de fricción en un sistema de tuberías lisa de PVC, a partir de datos de caídas de presión, para el laboratorio de la planta piloto de la carrera de ingeniería química de la FES Zaragoza” Rubio Martínez, Alejandro, Asesor. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Estudios Superiores Zaragoza. México D.F., 2008.
- 24) Loza Morales, Francisco. “Diseño de una práctica de laboratorio para calculo de factores de fricción en tubos circulares” Valiente Barderas, Antonio, Asesor. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. México D.F., 1978.
- 25) Martínez Blanco Cynthia Ivette. “Elaboración de un plan de calibración, principios de medición y calculo de incertidumbre para medidores de líquidos, de presión diferencial y área variable”. Santamaría Mata, Praxedis Israel Asesor. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Estudios Superiores Zaragoza. México D.F., 2004.

REFENCIAS ELECTRÓNICAS

- 26) Ing. Arturo García (Junio, 5, 2008) Impulso y cantidad de movimiento (www) URL: <http://docentes.uacj.mx/agarcia/Cursos/Fisicaii/Impulso/impulso.htm>
- 27) J. J. de Felipe (Marzo, 29, 2009) Laboratori de mecànica de fluids i motors tèrmics. E.U.P.M. Departament de màquines i motors tèrmics. U.P.C. Anàlisis dimensional y semejanza (www) URL: <http://-eupm.upc.es/~mmt/tem4.doc>
- 28) Emilio Rivera Chávez (Julio, 18, 2002) Análisis dimensional y similitud física (www) URL: <http://ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Tema5.pdf>

- 29) Sapiensman (Mayo, 9, 2008) Conceptos básicos de neumática e hidráulica (www)
URL: <http://www.sapiensman.com/neumatica/index.htm>
- 30) Ángel Franco García, (Junio, 5, 2008), Dinámica de fluidos, (www) URL:
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernouilli.htm#Fluidos%20ideales>
- 31) Escuela universitaria de ingeniería técnica agrícola de ciudad real, (Mayo, 27, 2008)
Hidráulica generalidades,
(www) URL: http://uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema1.PDF
- 32) Universidad de Sonora, Biblioteca digital, (Mayo, 30, 2009) (www) URL:
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2496/Capitulo4.pdf>

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A-1

Factores de conversión

MASA

	<i>lb</i>	<i>Kg</i>	<i>g</i>	<i>ton</i>	<i>slug</i>
<i>lb</i>	1	0.4535	453.5923	$4.535 \cdot 10^{-4}$	0.0310
<i>Kg</i>	2.2046	1	1,000	0,001	0.0685
<i>g</i>	0.0022	0.001	1	$1 \cdot 10^{-6}$	6.8521
<i>ton</i>	2,204.6226	1.000	$1 \cdot 10^6$	1	68.5217
<i>slug</i>	32.1740	14.5939	14,593.9	0.0145	1

Tabla A-1.1 Factores de conversión de Masa

*fuente3) B-14 pp.

LONGITUD

	<i>cm</i>	<i>m</i>	<i>in</i>	<i>ft</i>	<i>yd</i>
<i>cm</i>	1	0.01	0.3937	0.0328	0.0109
<i>m</i>	100	1	39.3700	3.2808	1.0936
<i>in</i>	2.54	0.0254	1	0.0833	0.0277
<i>ft</i>	30.48	0.3048	12	1	0.3333
<i>yd</i>	91.44	0.9144	36	3	1

Tabla A-1.2 Factores de conversión de Longitud

*fuente3) B-13 pp.

VOLUMEN

	m^3	cm^3	in^3	ft^3	<i>Lt</i>	<i>gal</i>
m^3	1	$1 \cdot 10^6$	61,023.7440	35.3146	1,000	264.1720
cm^3	$1 \cdot 10^{-6}$	1	0.0610	$3.5 \cdot 10^{-5}$	0.001	$2.64 \cdot 10^{-4}$
in^3	$1.64 \cdot 10^{-5}$	16.3870	1	$5.79 \cdot 10^{-4}$	0.0163	$4.329 \cdot 10^{-3}$
ft^3	0.0283	28,316.8465	1,728	1	28.3168	7.4805
<i>Lt</i>	0.001	1,000	61.0237	0.0353	1	0.2641
<i>gal</i>	$3.7854 \cdot 10^{-3}$	3,785.4117	231	0.1336	3.7854	1

Tabla A-1.3 Factores de conversión de Volumen

*fuente3) B-13 pp.

FUERZA

	Kg^{\rightarrow}	<i>N</i>	lb^{\rightarrow}	<i>D</i>	<i>poundal</i>
Kg^{\rightarrow}	1	9.8078	2.205	980,871.88	70.9348
<i>N</i>	0.1020	1	0.2248	$1 \cdot 10^5$	7.2318
lb^{\rightarrow}	0.4536	4.448	1	444,839.85	32.17
<i>D</i>	$1.019 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.248 \cdot 10^{-6}$	1	$7.2318 \cdot 10^{-5}$
<i>poundal</i>	0.0140	0.1382	0.0310	13,827.7852	1

Tabla A-1.4 Factores de conversión de Fuerza

*fuente3) B-13 pp.

PRESIÓN

	atm	bar	pa	mm Hg	lb/in ²	Kg/cm ²
atm	1	1.0132	101,325	760	14.6959	1.0332
bar	0.9869	1	1•10 ⁵	750.0616	14.5037	1.0197
pa	9.869•10 ⁻⁶	1•10 ⁻⁵	1	0.0075	1.5•10 ⁻⁴	101972
mmHg	1.32•10 ⁻³	1.33•10 ⁻³	133.3223	1	0.0193	1.36•10 ⁻³
lb/in ²	0.0680	0.0689	6,894.7572	51.7149	1	0.0703
Kg/cm ²	0.9678	0.9806	98,066.5	735.5592	14.2233	1

Tabla A-1.5 Factores de conversión de Presión

*fuente3) B-15 pp.

ENERGÍA

	Kg•m	Joule	cal	atm•Lt	KW•hr	BTU	lb [→] •ft
Kg•m	1	9.8066	2.3423	0.0967	2.7241•10 ⁻⁶	9.2948•10 ⁻³	7.2330
Joule	0.1019	1	0.2388	9.8692•10 ⁻³	2.777•10 ⁻⁷	9.4781•10 ⁻⁴	0.7375
cal	0.4269	4.1868	1	0.0413	1.163•10 ⁻⁶	3.9670•10 ⁻³	3.0870
atm•Lt	10.332	10,132	24.2085	1	2.8145•10 ⁻⁵	0.0960	74.7333
KW•hr	367,097.83	3,600,000	860,112.29	35,529.23	1	3,412.1282	2,655,219.71
BTU	107.5861	1055.06	252.0750	10.4126	2.9307•10 ⁻⁴	1	778.1711
lb [→] •ft	0.1382	1.3558	0.3239	0.0133	3.7661•10 ⁻⁷	1.2850•10 ⁻³	1

Tabla A-1.6 Factores de conversión de Energía

*fuente3) B-15 pp.

TEMPERATURA

	°C	K	°F	°R
°C	1	=K - 273.15	=°F $\left(\frac{9}{5}\right) + 32$	=°R - 491.67 $\left(\frac{9}{5}\right)$
K	=°C+273.15	1	=°F+459.67 $\left(\frac{5}{9}\right)$	=°R $\left(\frac{5}{9}\right)$
°F	=°C $\left(\frac{9}{5}\right) + 32$	=K $\left(\frac{9}{5}\right) - 459.67$	1	=°R - 459.67
°R	=°C+273.15 $\left(\frac{9}{5}\right)$	=K $\left(\frac{9}{5}\right)$	=°F+459.67	1

Tabla A-1.7 Factores de conversión de Temperatura

*fuente21) 792 pp

ANEXO A-2

Propiedades físicas del agua y del Mercurio

<i>Líquido</i>	<i>Temperatura T (°C)</i>	<i>Densidad ρ(Kg/m³)</i>	<i>Viscosidad μ (kg/m•s)</i>	<i>Viscosidad cinemática $\nu \times 10^{-6}$ (m²/s)</i>	<i>Peso especifico γ (N/m³)</i>	<i>Presión d' vapor Pv(pa)</i>
Agua	0	999.90	1.792•10 ⁻³	1.7921	9,809.019	588
	5	1,000.00	1.519•10 ⁻³	1.5190	9,810.000	882
	10	999.70	1.308•10 ⁻³	1.3053	9,807.057	1,176
	15	999.10	1.140•10 ⁻³	1.1410	9,801.171	1,666
	20	998.20	1.002•10 ⁻³	1.0038	9,792.342	2,447
	25	997.01	8.94•10 ⁻³	8.9668	9,781.354	3,168
	30	995.70	7.97•10 ⁻³	8.0044	9,767.817	4,297
	35	994.50	7.23•10 ⁻³	7.2699	9,749.000	5,834
40	992.20	5.98•10 ⁻³	6.0270	9,733.482	7,400	

Tabla A-2.1 *Propiedades del agua a presión atmosférica*

*fuente 15) 805 pp.

<i>Líquido</i>	<i>Temperatura T (°C)</i>	<i>Densidad ρ(Kg/m³)</i>
Mercurio	0	13,595.08
	10	13,570.44
	20	13,545.87
	30	13,521.36
	40	13,496.92

Tabla A-2.2 *Densidad del mercurio a presión atmosférica*

*fuente 14) 2-93 pp

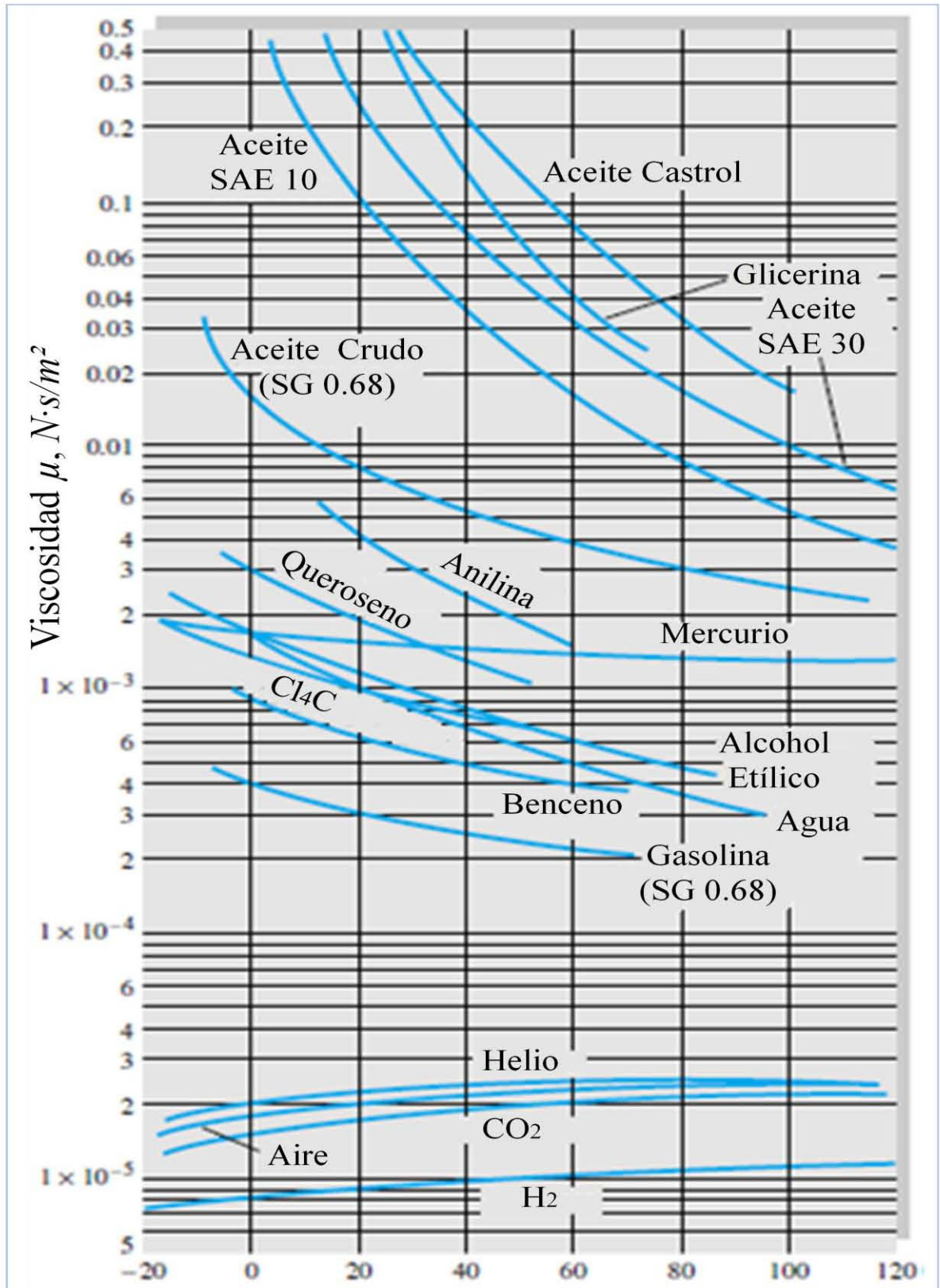


Grafico A-2 Viscosidad absoluta de algunos fluidos a presión atmosférica.

*fuente21) 769 pp

ANEXO A-3

Rugosidad absoluta de algunos materiales

<i>Material</i>	<i>ε (mm)</i>
Vidrio, Cobre, Latón, plásticos, PVC y hule	0.0015
Tubos industriales de Latón	0.025
Tubos de madera	0.2 a 1
Hierro forjado	0.05
Fierro fundido nuevo	0.25
Fierro fundido oxidado	1 a 1.5
Fierro fundido, con incrustaciones	1.5 a 3
Fierro fundido, centrifugado	0.05
Fierro fundido nuevo, con bridas o juntas de maco y campana	0.15 a 0.3
Fierro galvanizado	0.15
Acero rolado, nuevo	0.05
Acero laminado nuevo	0.04 a 0.1

*Tabla A-3 Rugosidad absoluta de materiales***fuente32) 93pp*

ANEXO A-4

Rugosidad relativa de algunos materiales

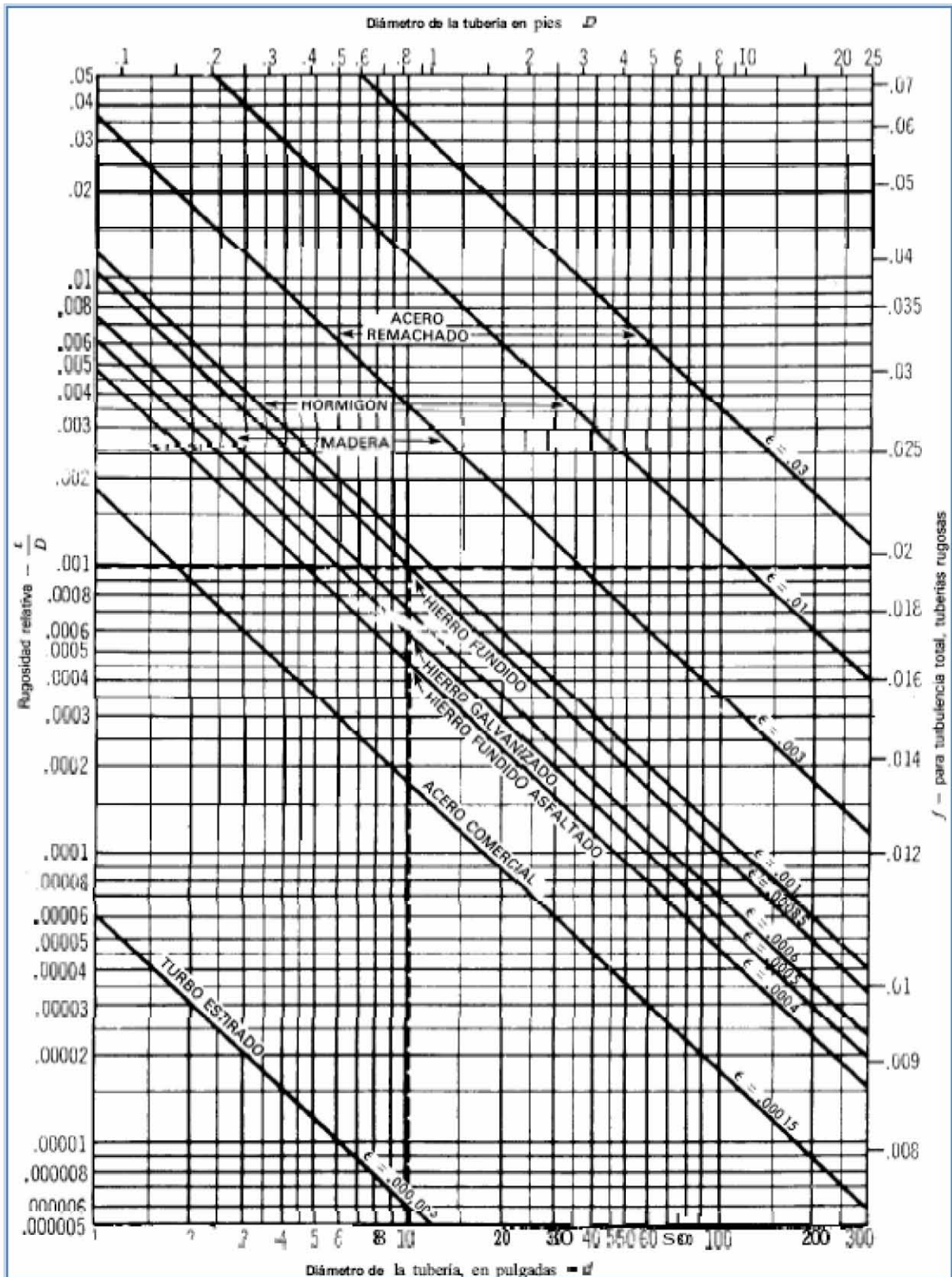


Grafico A-4 Rugosidad relativa y factores de fricción para flujo en régimen de turbulencia total

*fuente 3) A-42 pp

ANEXO A-5

Valores de α para la formula de Genijew

Grupo	Características	Valores de α
I	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con poco contenido mineral que no origina corrosión. • Agua con un pequeño contenido de materia orgánica y de solución de hierro 	$\alpha = 0.005$ a 0.055 Promedio 0.025
II	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con poco contenido mineral que origina corrosión. • Agua que contiene menos de 3 mg/Lt de materia orgánica y hierro en solución 	$\alpha = 0.055$ a 0.18 Promedio 0.07
III	<ul style="list-style-type: none"> • Agua que origina fuerte corrosión y con escaso contenido de cloruros y sulfatos (menos de 100 a 150 mg/Lt). • Agua con un contenido de hierro de más de 3 mg/Lt 	$\alpha = 0.18$ a 0.40 Promedio 0.20
IV	<ul style="list-style-type: none"> • Agua que origina corrosión, con un gran contenido de cloruros (más de 500 a 700 mg/Lt). • Agua impura con una gran cantidad de materia orgánica. 	$\alpha = 0.40$ a 0.60 Promedio 0.51
V	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con cantidades importantes de carbonatos, pero de dureza pequeña permanente, con residuo denso de $2,000 \text{ mg/Lt}$ 	$\alpha = 0.6$ a más de 1.0

Tabla A-5 Valores de α para la formula de Genijew

*fuente32) 95 pp

ANEXO A-6

Longitudes equivalentes L y L/D nomograma del coeficiente de resistencia K

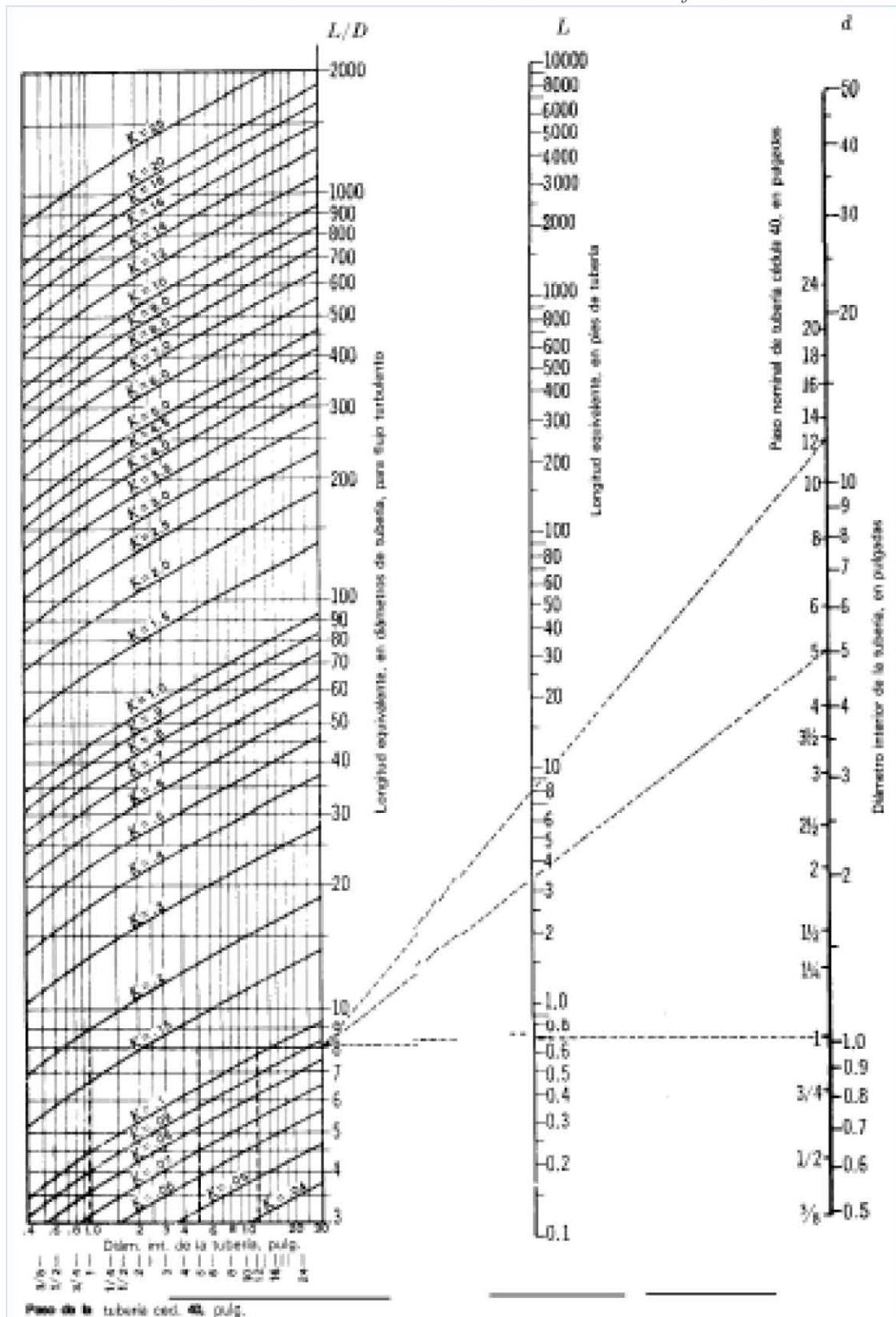


Grafico A-6 Nomograma del coeficiente de resistencia K

*fuente3) 51 pp

ANEXO A-7

Valores del coeficiente K en pérdidas singulares

ACCESORIO	K
Codos	
Radio corto 90° con bridas o extremo liso	0.3
Radio corto 90° extremo roscado.	1.5
Radio largo 90° con bridas o extremo liso	0.2
Radio largo 90° extremo roscado.	0.7
Radio largo 45° con bridas.	0.2
Radio corto 90° con bridas o extremo liso	0.3
Radio corto 90° extremo roscado.	1.5
Curvas a 180°	
Curvas a 180° con bridas	0.2
Curvas a 180° extremo roscado.	1.5
Tés	
Paso directo con bridas o extremos lisos	0.2
Paso directo con extremos roscados	0.9
Salida de lado con bridas o extremos lisos	1.0
Salida de lado con extremos roscados	2.0
Unión con extremos roscados	0.08
Válvulas	
Globo totalmente abierta	10
Angulo totalmente abierta	2
Compuerta totalmente abierta	0.15
Compuerta 1/4" cerrada	0.26
Compuerta 1/2" cerrada	2.1
Compuerta 3/4" cerrada	17
Check en el sentido del flujo	2
Bola totalmente abierta	0.05
Bola 1/3 cerrada	5.5
Bola 2/3 cerrada	210

*Tabla A-7 Valores del coeficiente K en pérdidas singulares***fuente**11) II.14 pp*

ANEXO A-8

Diagrama de Moody

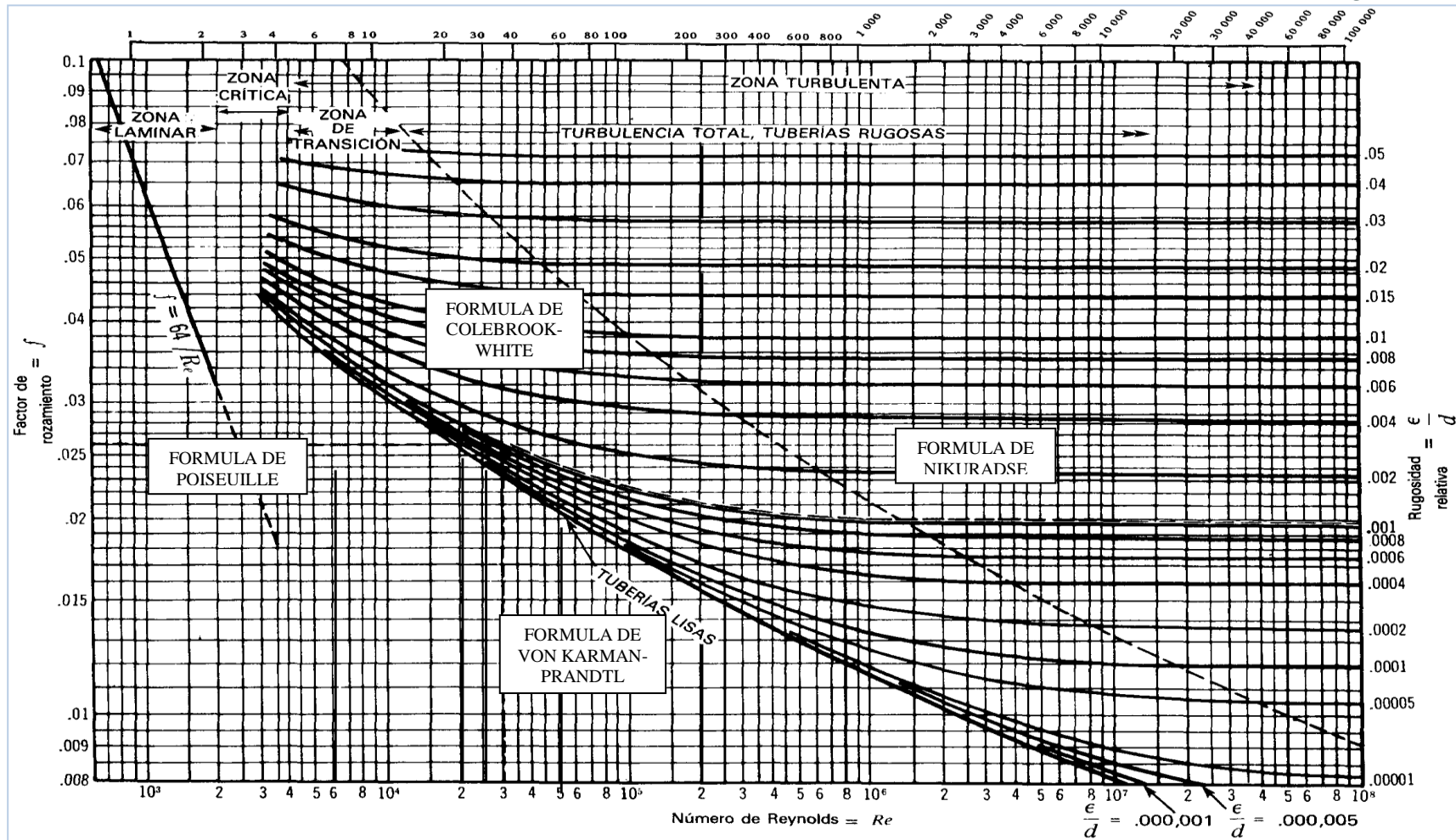


Grafico A-8 Diagrama de Moody

*fuente 3) A-43 pp

ANEXO A-9

Diagrama de equipo de tuberías lisas PVC

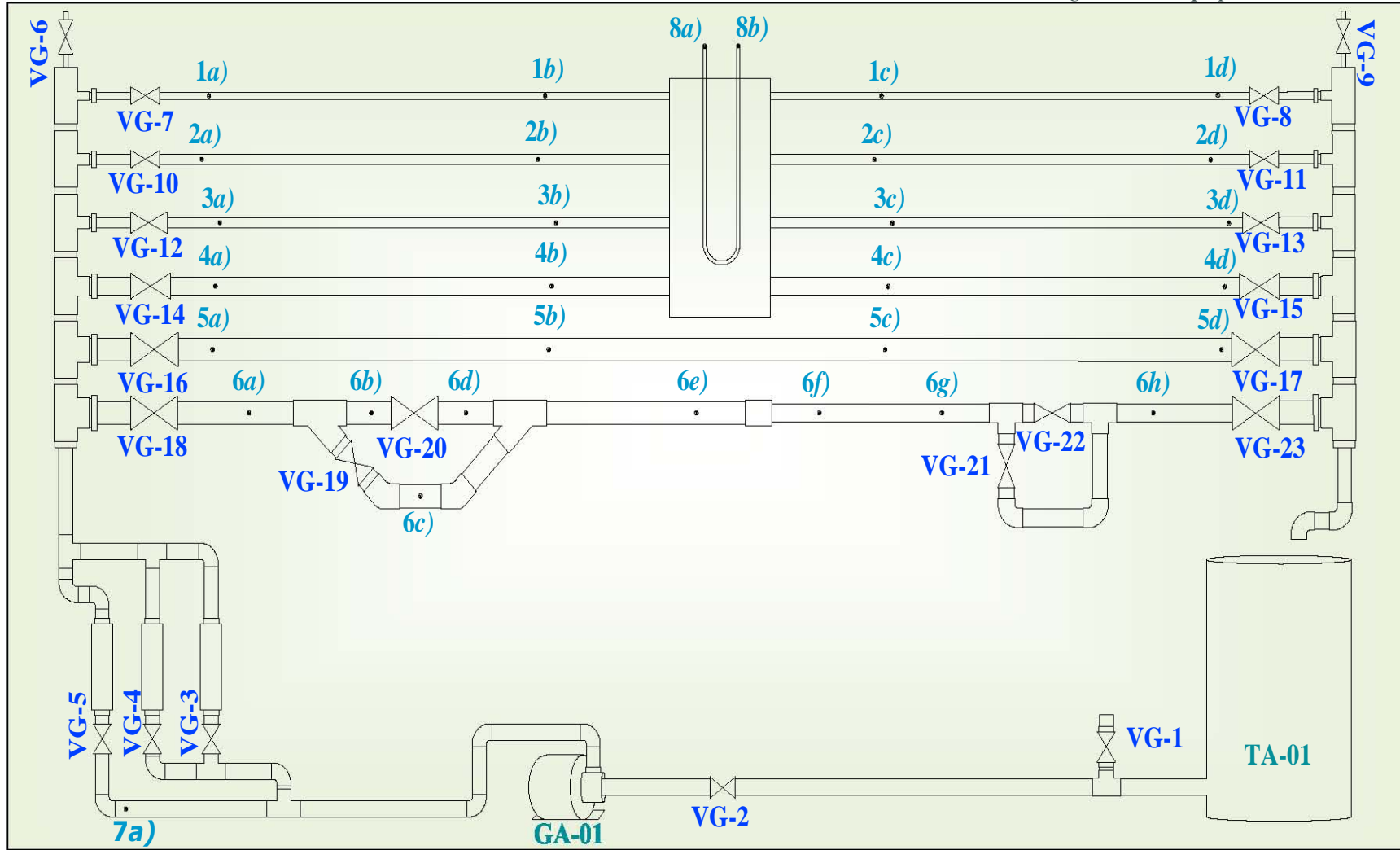


Figura A-9 Equipo de tuberías lisas PVC

Diámetro nominal	Diámetro exterior		Diámetro interior		Espesor de pared	
	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
½"	0.840	21.3	0.609	15.5	0.109	2.8
¾"	1.050	26.7	0.810	20.6	0.113	2.9
1"	1.135	33.4	1.033	26.2	0.133	3.4
1¼"	1.680	42.2	1.363	34.6	0.140	3.6
1½"	1.900	48.3	1.593	40.5	0.145	3.7
2"	2.375	60.3	2.049	52.0	0.154	3.9
2½"	2.875	73.0	2.455	62.1	0.023	5.2
3"	3.500	88.9	3.042	77.3	0.216	5.5
4"	4.500	114.3	3.989	101.5	0.237	6.0
6"	6.625	168.3	6.031	153.2	0.280	7.1
8"	8.625	219.1	7.942	201.7	0.322	8.2
10"	10.750	273.1	9.976	253.4	0.365	9.3
12"	12.750	323.9	11.889	302.0	0.406	10.3
14"	14.000	355.5	13.073	332.1	0.437	11.1
16"	16.000	406.4	14.940	379.5	0.500	12.7
18"	18.000	457.2	16.809	426.9	0.552	14.3
20"	20.000	508.0	18.743	476.1	0.593	15.1
24"	24.000	609.6	25.544	572.6	0.687	17.4

Tabla A-10 Diámetros de tubería comercial PVC

*fuente32)

ANEXO B

Calibración de Rotámetros

B.1 Alcance

- Este procedimiento de calibración cubre el cálculo de caudal de manera directa para medidores de área variable (rotámetros).
- Dicho método puede ser aplicable a cualquier tipo de sistema de flujo.

B.2 Método

En este procedimiento de calibración se emplea el método gravimétrico

B.3 Equipo y/o Material

1. Sistema de flujo
2. Balanza. Resolución 1/1,000 g.
3. Termómetro 0 a 50 °C. Resolución 1°C
4. Cronometro de 0 a 10 hr. Resolución 1/1,000 s.
5. Recipiente de almacenamiento de agua.
6. Tela de algodón (que no suelte pelusa)
7. Agua

B.4 Recomendaciones

- Tener un conocimiento previo del sistema de flujo, característica de la tubería, material, diámetros etc.
- Identificar los accesorios, válvulas, variaciones de diámetros. Y corroborar su nomenclatura asignada.
- Especificar los componentes del sistema. La capacidad del tanque de alimentación, tipo y características de la bomba (potencia, rpm etc.)
- Realizar el balance de energía de todo el sistema de flujo (ver sección II.4). Calcular las pérdidas por fricción por el método de las longitudes equivalentes (II.8.3.1)
- Es determinante contar con un recipiente limpio y seco que nos ayude a recibir el líquido del sistema. El objetivo es que el líquido
- Forme un menisco reproducible con un ángulo plano y una altura unificada
- Cerrar todas las válvulas con que cuenta el sistema de flujo, excepto la válvula de succión de la bomba
- Determinar el punto de calibración y abrir la válvula de descarga. Es importante saber el número de vueltas o posición de la válvula de descarga que ha sido abierta respecto a un punto de referencia de la bomba ya que esta controla el caudal

B.5 Calibración

- Se debe de pesar el recipiente destinado a la recepción del líquido de proceso. Dicha masa se le denominara Masa de Recipiente Seco (MRS). Se recomienda realizar dicha operación al menos cinco veces para poder obtener un valor muy aceptable. Dichos valores pueden ser reportados de la siguiente manera.

<i>Masa del Recipiente Seco (MRS)</i>		
<i>Registro No.</i>	<i>Masa (Kg)</i>	<i>Temperatura T_{AMB} ($^{\circ}C$)</i>

Tabla B-1

- Encender la bomba, ajustar el caudal requerido. Registrar la cantidad de vueltas o posición aplicadas a la válvula de descarga.
- Dejar estabilizar el flujo por lo menos un par de minutos
- Una vez estabilizado el flujo se prosigue a la toma de muestra, procurando evitar que el líquido recibido no salpique fuera del recipiente. Se mide el tiempo de llenado (t), a un nivel tal que pueda ser apreciable y que no se corra el riesgo de derramarse.
- Se toma la lectura de la temperatura ambiente (T_{AMB}), la temperatura del fluido (T_{FLUIDO}) al igual que la caída de presión que presenta el flujo (mmHg) y se registraran en la siguiente tabla.

<i>Registro No.</i>	<i>Volumen (m^3)</i>	<i>Tiempo (s)</i>	<i>Presión (mm Hg)</i>	T_{AMB} ($^{\circ}C$)	T_{FLUIDO} ($^{\circ}C$)	<i>Caudal (m^3/s)</i>

Tabla B-2

- Se pesara el recipiente con la muestra del líquido de proceso en una balanza calibrada, cuidando de que l liquido no sea derramado. El resultado se reportara de la siguiente manera.

<i>Masa de Recipiente Lleno (MRL)</i>				
<i>Registro No.</i>	<i>Masa (g)</i>	<i>Masa (Kg)</i>	T_{AMB} ($^{\circ}C$)	T_{FLUIDO} ($^{\circ}C$)

Tabla B-3

- Calcular la Masa Total de Fluido de proceso (MTF) colectada en el recipiente, restando la Masa del Recipiente Lleno (MRL) y la Masa del Recipiente Seco (MRS), y registrando los resultados en la tabla B-4

<i>Masa Total de Fluido (MTF)</i>				
<i>Registro No.</i>	<i>Masa (g)</i>	<i>Masa (Kg)</i>	T_{AMB} ($^{\circ}C$)	T_{FLUIDO} ($^{\circ}C$)

Tabla B-4

- Se calcula el caudal másico (w) mediante la división de MTF entre el tiempo que se tarda tardo en llenarse el recipiente. A dicho caudal se le denominará Caudal Másico Directo (CMD) dividiendo este entra la densidad el liquido de proceso a la temperatura que se realizo el procedimiento, obtendremos el Caudal Volumétrico Directo (CVD)

<i>Registro No.</i>	<i>Masa (Kg)</i>	<i>Tiempo (s)</i>	T_{AMB} ($^{\circ}C$)	T_{FLUIDO} ($^{\circ}C$)	<i>CMD (Kg^3/s)</i>	<i>CVD (m^3/s)</i>

Tabla B-5

- Realizar el balance de energía correspondiente. Calcular el caudal del medidor de flujo que se denomina Caudal Volumétrico Indirecto (CVD) y Caudal Másico Indirecto (CMI)

<i>Medidor Tipo</i>	<i>Caudal Volumétrico Indirecto (CVI)</i>	<i>Caudal Másico Indirecto (CMI)</i>

Tabla B-6

- Se realiza el procedimiento, hasta obtener mínimo cinco mediciones en cada apertura programada para la válvula de descarga de la bomba.

ANEXO C

Memoria de cálculo

ρ (Kg/m ³)	998.20
μ (Kg/m·s)	1.0021x10 ⁻³
g (Kg·m/N·s ²)	1.00
ε (m)	1.5x10 ⁻⁶
π	3.1416

$D_{nominal}$ (in)	$D_{interno}$ (m)	A (m ²)
1/2 "	0.0155	0.00018
3/4 "	0.0206	0.00033
1 "	0.0262	0.00053
1 1/4 "	0.0346	0.00094
1 1/2 "	0.04050	0.00128

Ejemplo para tubería de 1/2", una caída de presión 27 mmHg, una longitud de 3m, y un flujo de 5 GPM de flujo:

FORMULA	SUSTITUCIÓN Y RESULTADO
$A = \pi r^2$	$A = 3.1416 (0.00775 \text{ m})^2$ $A = 0.00018 \text{ m}^2$
$u = \frac{Q}{A}$	$u = \frac{5 \text{ gal}/\text{min}}{0.00018 \text{ m}^2} \left(\frac{1 \text{ m}^3}{264.1720 \text{ gal}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right)$ $u = 1.6718 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$Re = \frac{Du\rho}{\mu}$	$Re = \frac{0.0155 \text{ m} \left(1.6718 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left(998.20 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)}{1.0021 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$ $Re = 2.581 \times 10^4$
$\frac{-\Delta P}{\rho}$	$\frac{-\Delta P}{\rho} = \frac{27 \text{ mmHg}}{998.20 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \left(\frac{1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}}{735.5592 \text{ mmHg}} \frac{10,000 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \right)$ $\frac{-\Delta P}{\rho} = 0.3787 \frac{\text{Kg} \rightarrow \text{m}}{\text{Kg}}$

FORMULA	SUSTITUCIÓN Y RESULTADO
$f = \frac{2g_c D \left(\frac{-\Delta P}{\rho} \right)}{Lu^2}$	$f = \frac{2 \cdot 1 \frac{\text{Kgm}}{\text{Ns}^2} 0.0155\text{m} 0.3787 \frac{\text{Kg} \rightarrow \text{m}}{\text{Kg}}}{3\text{m} \left(1.6718 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2} \left(\frac{1\text{N}}{0.102\text{Kg} \rightarrow} \right)$ $f = 0.0137 \quad \text{Experimental}$
$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$	$f = \frac{0.3164}{2.581 \times 10^4^{0.25}}$ $f = 0.0250 \quad \text{Teórico}$

L (m)	Q (GPM)	ΔP (mm Hg)	u (m/s)	Re	(ΔP/ρ) (Kg [→] •m/Kg)	f	f teórico
3	5	27.00	1.6718	2.581E+04	0.3787	0.0137	0.0250