



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E
INGENIERÍA

*Desarrollo de un simulador con interfaz gráfica para el
grupo de estudio de las pérdidas de carga H38D-EA*

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:
FABIOLA ZAVALA DÍAZ

ASESOR: DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO

CUERNAVACA MOR.

MAYO 2023

Resumen

Modelar y simular los equipos de los laboratorios permite a los estudiantes de ingeniería contar con herramientas didácticas para complementar los experimentos de sus prácticas de laboratorios. En este trabajo, se desarrolló un simulador con interfaz gráfica de usuario para calcular las pérdidas de energía en el sistema de tuberías del equipo H38D/EA. Los valores de las variables de entrada que requiere el simulador corresponden a los datos establecidos por el usuario del equipo experimental. El simulador cuenta con una pantalla principal para la obtención de resultados puntuales y con pantallas alternativas para analizar las propiedades físicas y/o resultados de cálculo de uno o más fluidos. Los resultados obtenidos del simulador con agua como fluido de trabajo fueron validados de manera experimental a diferentes condiciones de operación. Actualmente la implementación de los simuladores como herramientas didácticas han desarrollado competencias en el análisis de resultados en los estudiantes de ingeniería.

Nomenclatura

m	Masa, (kg)
V	Volumen, (m^3)
$\vec{a}\vec{b}$	Volumen específico, (m^3/kg)
F	Fuerza, (N)
P	Presión, (N/m^2)
A	Área, (m^2)
h	Altura, (m)
v	Velocidad, (m/s)
Q	Caudal, (m^3/s)
w	Flujo en peso, (N/s)
M	Flujo másico, (kg/s)
EP	Energía potencial, (m)
EC	Energía cinética, (m)
g	Gravedad, (m/s^2)
N_R	Número de Reynolds
D	Diámetro, (m)
z	Elevación, (m)
h_A	Energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico, (m)
h_R	Energía que se remueve del fluido con un dispositivo mecánico, (m)
h_L	Pérdida de energía menor por fricción en las tuberías o menor por accesorios, (m)
f	Factor de fricción
ε	Rugosidad relativa, (m)
D_i	Diámetro interno, (m)
DP	Diferencia de presión
L	Longitud de tubería, (m)
K	Coefficiente de resistencia
L_e/D	Longitud equivalente
f_t	Factor de fricción total
<i>Letras griegas</i>	
ρ	Densidad, (kg/m^3)
μ	Viscosidad dinámica, (Pas)
η	Viscosidad cinemática, (kg/s)
γ	Peso específico, (N/m^3)

Dedicatoria y Agradecimientos

Dedicatoria

Dedicado principalmente a Dios por la salud, el conocimiento y la oportunidad de conocer los profesores y compañeros correctos para crecer personalmente, profesionalmente y lograr culminar esta etapa más en mi vida.

A mí por siempre confiar en que lograría terminar mi carrera y buscar la manera económica para lograrlo, a mis padres y a mi hermana Julieth Zavaleta por su apoyo incondicional, a Jesús Jazeth por darme los ánimos cuando quise desistir del objetivo principal.

Agradecimientos

A Dios por la gran bendición de haberme permitido llegar hasta este momento, por cada prueba en estos años a nivel profesional y personal porque gracias a su amor y misericordia jamás perdí el objetivo principal.

A mis padres por darme la oportunidad dentro de sus posibilidades para culminar mi formación, a mi hermana porque desde que inicio todo me llamaba ingeniero y por incluirme en sus oraciones siempre que salía de casa camino a la universidad.

A mi tía Alicia Díaz por la oportunidad laboral y permitirme conocer otro país, a mi tía Leticia Díaz por brindarme su casa por todos estos años de universidad, a Jesús Jazeth por todos los abrazos llenos de amor y sonrisas en mis desvelos estudiando.

Por último, a los profesores que me acompañaron y enseñaron tanto de la vida y por qué amar la ingeniería química, a la Dra. Miriam Navarrete Procopio por todo el apoyo durante las clases, el desarrollo de la tesis y por todo el conocimiento brindado, por la atención y por la resolución de dudas.

Índice general

Resumen	i
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	ix
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivo general	2
1.4. Objetivos específicos	2
2. Marco teórico	3
2.1. Fluidos	3
2.1.1. Clasificación de los fluidos	3
2.1.2. Características de los fluidos	4
2.2. Estática de fluidos	5
2.2.1. Presión de los fluidos estáticos	5
2.3. Dinámica de fluidos	5
2.3.1. Ecuación de continuidad	6
2.3.2. Ecuación de Bernoulli	7
2.3.3. Pérdidas menores	9
2.4. Estado del arte	14
2.4.1. Simuladores	14
2.4.2. Trabajos de tesis	15
3. Metodología	17
3.1. Definición del Sistema	17
3.1.1. Procedimiento de Operación	19
3.2. Programación con interfaz gráfica del sistema de tuberías H38D/EA	20
3.3. Validación del modelo matemático	24
3.3.1. Diseño de pruebas experimentales	24

4. Resultados	31
4.1. Análisis de los alcanos	31
4.2. Análisis del hexano, isohexano y ciclohexano	34
4.3. Análisis de los alcoholes	36
5. Conclusiones y recomendaciones	40
5.1. Conclusiones	40
5.2. Recomendaciones	40

Índice de figuras

2.1. Sección transversal de una tubería	5
2.2. Volumen de control	7
2.3. Volúmen de control para la ecuación de Bernoulli	8
2.4. Pérdida de energía por fricción	10
2.5. Rugosidad Relativa	11
2.6. Rugosidad Relativa	13
3.1. Equipo <i>H38D/EA</i> "Unidad de Pérdidas Menores"	17
3.2. Sistema de "Unidad de Pérdidas Menores"	18
3.3. Algoritmo para el cálculo de pérdidas de energía en el equipo <i>H38D/EA</i>	21
3.4. Pantalla principal del simulador del equipo <i>H38D/EA</i>	22
3.5. Datos de entrada	23
3.6. Selección de válvula	23
3.7. Pantallas de datos y resultados	24
3.8. Válvula de bola	26
3.9. Válvula de membrana	26
3.10. Válvula de compuerta	27
3.11. Válvula de aguja	27
3.12. Válvula de lenticular	27
3.13. Codo de 90°	28
4.1. Propiedades fisicoquímicas para los alcanos	33
4.2. Parámetros para el cálculo de perdidas menores por fricción para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$	33
4.3. Perdidas de energía por fricción de diferentes alcanos para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$	34
4.4. Propiedades fisicoquímicas	35
4.5. Parámetros para el cálculo de perdidas menores por fricción para un sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$	36
4.6. Perdidas menores por fricción para una sección tubular para un $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$	38
4.7. Propiedades fisicoquímicas para los alcoholes	38

4.8. Parámetros para el cálculo de pérdidas menores por fricción para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$	39
4.9. Pérdidas menores por fricción para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$	39

Índice de tablas

2.1. Clasificación de los fluidos	4
2.2. Características de los fluidos	4
2.3. Diferentes tipos de flujos	6
3.1. Componentes del equipo H38D/EA.	18
3.2. Tabla de llenado	24
3.3. Condiciones de operación para las pruebas experimentales	25
3.4. Condiciones de Operación	28
3.5. Propiedades del fluido	29
3.6. Comparación de las pérdidas menores en las válvulas del equipo <i>H38D/EA</i> y del simulador	29
3.7. Comparación de las pérdidas menores por fricción en los tubos del equipo <i>H38D/EA</i> y del Simulador	30
4.1. Propiedades de los alcanos	31
4.2. Resultados de las propiedades y parámetros de los alcanos	32
4.3. Propiedades del ciclohexano	35
4.4. Propiedades de los alcoholes	36

1 *Introducción*

1.1 **Introducción**

Los fluidos son sustancias capaces de fluir y estos se adaptan a la forma física del recipiente que los contiene, todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma. Los fluidos pueden ser divididos en líquidos y gases, las principales diferencias entre estos fluidos son [1] [2]:

- Los fluidos líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles.
- Los líquidos ocupan un volumen definido del sistema que los contiene dejando espacios y superficies libres en el sistema.

La comprensión de la mecánica de fluidos es importante para diversas áreas de la ingeniería, los ingenieros químicos deben comprender la mecánica de fluidos para diseñar los diferentes tipos de equipos de procesamiento químico y el diseño de sistemas de tuberías, plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de control. No es posible presentar la mecánica de fluidos de tal manera que todos los temas anteriores puedan ser tratados específicamente; sin embargo, es posible presentar los fundamentos de la mecánica de los fluidos para que los ingenieros puedan comprender el papel que desempeña el fluido en una aplicación particular [3] [4].

El sistema más común para llevar a cabo el transporte de fluidos de un punto a otro, es a través de sistemas de tuberías de sección circular las cuales se utilizan frecuentemente ofreciendo una mejor resistencia en la estructura del sistema y una mayor sección de transferencia. Anteriormente el agua era el único fluido común e importante que se transportaba por tuberías; sin embargo, hoy cualquier fluido se transporta por tuberías durante la producción, procesos, transporte y/o utilización [1] [5].

En este trabajo se desarrolló un simulador que permite calcular las pérdidas de energía menor y por fricción en un sistema de tuberías. Para ello se empleó una base de datos de las constantes de rugosidad para diferentes accesorios y se programaron las ecuaciones de pérdidas de carga. Adicionalmente el simulador calcula las propiedades de diferentes fluidos en función de la temperatura. Los resultados obtenidos con el simulador concuerdan satisfactoriamente con los obtenidos experimentalmente para el agua en el equipo *H38D/EA* “Unidad de Perdidas Menores”.

1.2 Justificación

En la mayor parte de los procesos los fluidos son dirigidos por líneas de tuberías, por lo que es importante el estudio de sistemas de suministro y distribución de fluidos a diferentes condiciones de operación. El desarrollo de simuladores ayuda a predecir el comportamiento del fenómeno evitando el desgaste de los equipos y el uso de insumos. En este trabajo se desarrolló un simulador para el equipo del laboratorio de fluidos *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores", con el objetivo de que los estudiantes del programa educativo de Ingeniería Química puedan realizar experimentos en el equipo *H38D/EA* y analizar sus resultados con los obtenidos en el simulador.

1.3 Objetivo general

Desarrollar un simulador para el cálculo de pérdidas menores por fricción y accesorios del sistema de tuberías del equipo *H38D/EA* "Unidad de pérdidas menores".

1.4 Objetivos específicos

- Programar las ecuaciones para el cálculo de pérdidas menores en la interfaz gráfica en MATLAB.
- Obtener las pérdidas menores de energía por fricción y accesorios de forma experimental en el equipo *H38D/EA*.
- Comparar los resultados experimentales contra los simulados en el modelo de pérdidas menores *PipeLoss*.

2 *Marco teórico*

A continuación se describen los elementos teóricos planteados por diferentes autores (Smith.V, Abott, Cengel.Y, Howard N. Shapiro, John R.Howell y Brahim Dincer), que permiten fundamentar el trabajo desarrollado en los capítulos posteriores [3] [6] [7] [8], [9], [10], [11], [12].

2.1 Fluidos

Se considera fluido a todo aquel cuerpo que tiene la capacidad de fluir, esta capacidad se debe a que la fuerza de cohesión intermolecular del cuerpo es débil y permite que el fluido se desplace libremente, este desplazamiento puede que vaya acompañado con un esfuerzo de corte que es el que permite que el fluido fluya.

Los líquidos presentan un volumen fijo, sin embargo al depositarlos en un recipiente toman la forma y el volumen del mismo, su volumen no disminuye con cualquier fuerza de presión aplicada, ya que los líquidos son incompresibles, es decir, el volumen utilizado por un líquido dentro de un recipiente o tubería no disminuye.

Los gases no poseen un volumen fijo ya que sus moléculas se encuentran totalmente dispersas y separadas por lo cual tienden a ocupar totalmente el volumen del recipiente que lo contiene. Los gases tienen la propiedad de ser compresibles, es decir, su volumen puede ser disminuido por una fuerza de presión aplicada al recipiente que lo contienen.

Tanto los líquidos como los gases tienden a efectuar cierta presión de forma uniforme en variadas direcciones del recipiente que los delimita, haciendo de estos que su estudio y su aplicación sea extensa.

2.1.1 Clasificación de los fluidos

En general la materia se puede clasificar por su forma física en la que se presenta en la naturaleza fase sólida, líquida y gas-vapor. Solo las fases líquido-gas de la materia comprenden a los fluidos 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de los fluidos

Estado de la materia	
Gases	Se denomina gas al estado de agregación de la materia en el cual bajo ciertas condiciones de temperatura y presión sus moléculas interactúan débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares, adoptando la forma del recipiente que lo contenga.
Líquidos	El líquido es un estado de agregación de la materia altamente incompresible. Las moléculas del líquido no son tan próximas como las del sólido, pero no tan lejanas como las del gas. Su volumen no varía mucho cuando es sometido a una cierta presión.

2.1.2 Características de los fluidos

En la solución de problemas y en el estudio del comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento intervienen características que juegan un papel importante que influyen en sus propiedades, diferencias esenciales entre líquidos y gases que hacen que el fluido sea tratado como tal. A continuación se describen las principales diferencias entre líquidos y gases 2.2.

Tabla 2.2 Características de los fluidos

Característica	Definición
Viscosidad	La viscosidad que presentan los gases es menor que la de los líquidos. La viscosidad genera que la velocidad de deformación pueda aumentar la tensión en el seno del medio continuo, es decir que nos permita predecir la velocidad de un fluido y cómo este afecta en el transporte de masa de un lugar a otro.
Compresibilidad	Los gases mantienen la característica de ser totalmente compresibles, a diferencia de los líquidos que son altamente incompresibles.

2.2 Estática de fluidos

La estática del fluido proviene del estudio de los líquidos en reposo, los cuales están regidos por las leyes de la estática que nos permiten conocer la localización de la fuerza ejercida por los fluidos dando su dirección y sentido.

2.2.1 Presión de los fluidos estáticos

La magnitud física que nos ayuda a conocer este valor es la presión, la cual está definida por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Donde F es la fuerza aplicada y A la superficie donde se aplica dicha fuerza. Entonces decimos que la presión es igual a la fuerza aplicada sobre un área determinada.

En los fluidos podemos encontrar fuerzas y de la misma manera presiones, los líquidos ejercen presiones sobre las paredes del recipiente que lo contienen, así como las presiones aplicadas a un cuerpo sumergido en el 2.1.

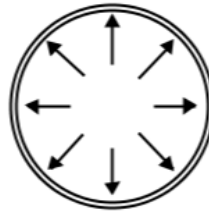


Fig. 2.1 Sección transversal de una tubería

Las presiones generadas por el fluido dependen de la naturaleza del fluido con el que se trabaje, tomando en cuenta la densidad (ρ), gravedad (g) y la profundidad (h), determinada por la siguiente ecuación:

$$P = \rho gh \quad (2.2)$$

2.3 Dinámica de fluidos

El estudio de las leyes que intervienen en el desplazamiento y movimiento de los fluidos a través de ductos y tuberías está dado por su mecánica, cinética y potencial. Conociendo así su comportamiento para poder analizar y diseñar

sistemas que nos ayuden a transportar cierta cantidad de fluido desde el punto fuente hasta el destino deseado.

2.3.1 Ecuación de continuidad

Para describir la ecuación de continuidad se debe saber que existen ciertas condiciones para que el fluido tenga un comportamiento continuo. La primera simplificación del fluido debe ser incompresible, así el fluido durante toda la trayectoria que tenga sobre la tubería, no cambiara su densidad (ρ). Es decir podemos tomar un punto cualquiera en la tubería y la densidad del fluido será la misma. El fluido debe ser no viscoso, no debe haber interacción con el fluido mismo ni con el recipiente que lo contenga. La tubería no deberá tener contacto con algún tipo de intercambio de calor.

Su velocidad (\vec{v}), presión (P) y su densidad (ρ) no se deben ver afectados por el tiempo de tal forma el fluido será estacionario, siendo así que las corrientes del fluido que se conduce en una tubería tendrá una misma velocidad en cualquier punto de la tubería.

Las unidades en cantidad un fluido que transita por un sistema de tuberías puede ser expresada de las siguientes formas 2.3 :

Tabla 2.3 Diferentes tipos de flujos

Símbolo	Nombre	Definición	Ecuación
Q	Flujo Volumétrico	Es el volumen del fluido que circula dentro de la tubería o sección por unidad de tiempo	$Q = Av$
W	Flujo en peso	Es el peso del fluido que circula dentro de la tubería o sección por unidad de tiempo	$W = Q\gamma$
M	Flujo en peso	Es la masa del fluido que circula dentro de la tubería o sección por unidad de tiempo	$M = Q\rho$

2.3.2 Ecuación de Bernoulli

Para el desarrollo de *la ecuación de Bernoulli*, se toma en cuenta toda la energía que nos da el sistema, considerando la ley de la conservación de la materia que la energía no se destruye solo se transforma.

Como se muestra en la figura 2.2, en una tubería se encuentran tres formas de energías que están dadas por la elevación z , velocidad v y la presión P .

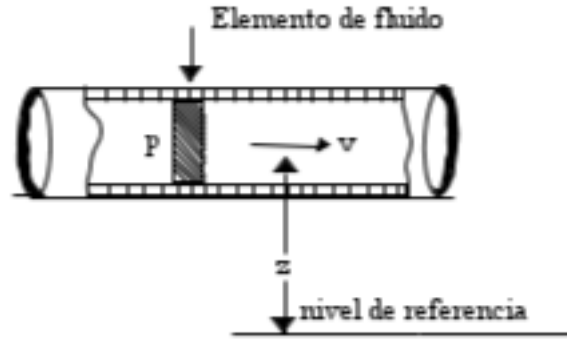


Fig. 2.2 Volumen de control

Representadas por las siguientes ecuaciones:

- **Energía Potencial**

Debido al nivel de referencia z por el peso del fluido w se tiene la energía potencial del elemento expresada por:

$$EP = wz \quad (2.3)$$

Donde w está dado por

$$w = \gamma V \quad (2.4)$$

- **Energía Cinética**

Por la velocidad generada en el sistema, la energía cinética del elemento se expresa:

$$EC = \frac{wv^2}{2g} \quad (2.5)$$

- **Energía de flujo**

Conocida como energía de presión, representa el trabajo requerido para el desplazamiento del fluido a través de una sección de la tubería, expresada por:

$$EF = \frac{wP}{\gamma} \quad (2.6)$$

Representado de esta forma la ecuación de energía de flujo.

La suma total de la energía potencial, cinética y la energía de flujo que se ven reunidas en el elemento fluido desplazado por de la tubería genera la ecuación de Bernoulli, donde dicho elemento de fluido se mueve de la sección 1 a la sección 2 presentando diferentes valores de P , z y v 2.3 .

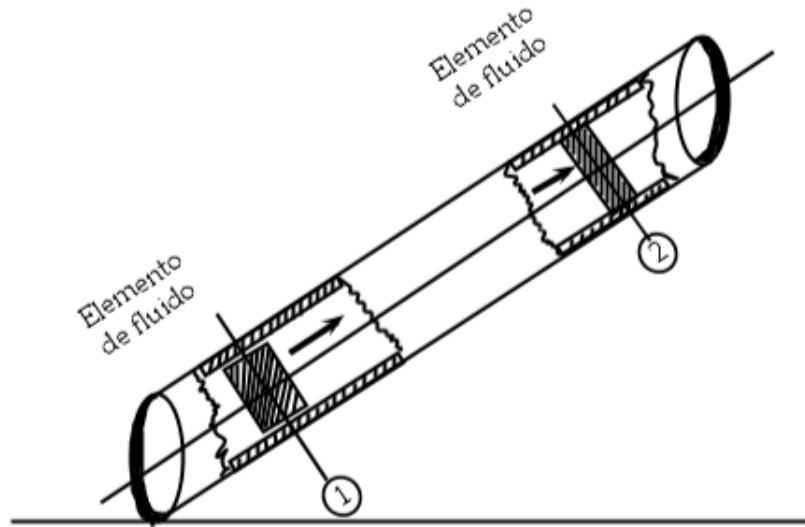


Fig. 2.3 Volúmen de control para la ecuación de Bernoulli

Las unidades utilizadas para estos términos están presentadas en energía como Newton- metro ($N - m$). La energía total para cada punto será:

Energía total sección 1

$$ET_1 = \frac{wP_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} \quad (2.7)$$

Energía total sección 2

$$ET_2 = \frac{wP_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g} \quad (2.8)$$

Si durante el desplazamiento en las secciones de la tubería no se agrega o se retira energía, entonces el principio de conservación de la materia dicta que para nuestro sistema la energía total en la sección 1 y 2 son iguales, representadas por:

$$ET_1 = ET_2$$

$$\frac{wP_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{wP_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g} \quad (2.9)$$

El peso del elemento w se desprecia ya que se considera constante durante todo el desplazamiento del fluido de esta forma obtenemos la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.10)$$

Los términos de la ecuación de Bernoulli, resulta de dividir una expresión de la energía entre el peso del fluido, por lo que en esto queda expresado la forma de energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve dentro del sistema. Expresado en el sistema SI las unidades son Nm/N .

Como resultado de la eliminación de los términos de fuerza la en la ecuación de Bernoulli la unidad resultante es tan solo el metro (m). Cuando se realiza el análisis del flujo de fluidos los términos se expresan comúnmente como altura dado por un nivel de referencia.

2.3.3 Pérdidas menores

La pérdida de energía del fluido es dada en particular por el comportamiento presentado en el flujo sea laminar o turbulento, por dicha razón es necesario conocer el tipo de flujo presente en el fluido. Para demostrar dicho comportamiento laminar o turbulento se contemplara las variables de densidad del fluido ρ , su viscosidad μ , el diámetro del tubo D y la velocidad promedio del fluido v , esto nos dará a conocer el número Reynolds (N_R).

Número de Reynolds

El número de Reynolds es la unidad adimensional que por medio de ecuación 2.3.3 permite pronosticar si el flujo es laminar o turbulento.

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (2.11)$$

El número de Reynolds se encuentra relacionado con la fuerza de inercia empleada a la viscosidad del fluido que atraviesa por una sección de tubería transversal, dicha viscosidad se ve impactada por el esfuerzo de corte generado, esto relacionado a la fuerza de inercia.

La presencia en un fluido de un número de Reynolds alto se debe a una velocidad elevada y a una viscosidad baja, ya que las líneas de flujo se ven alteradas provocando el caos y su turbulencia, mientras que para los fluidos que mantiene una viscosidad alta y una velocidad baja se mantienen bajo una línea de flujo laminar.

Cuando se aplica el número Reynolds a fluidos dentro de un sistema de tubería cerrado se entiende que para un resultado de Reynolds menor a 2000, este será laminar y para un Reynolds mayor a 4000 el flujo se comprende como turbulento, al intervalo existente entre los valores de 2000 y 4000 donde no existe una definición concreta para laminar o turbulento se conoce como región crítica donde para fines prácticos es necesario definir el flujo hacia un comportamiento laminar o turbulento ya que esto permitirá su análisis preciso.

Si $N_R < 2000$, Flujo laminar

Si $N_R > 4000$, Flujo turbulento

El flujo del fluido como se vio está comprendido en el razonamiento de las partículas y consecuentemente en la pérdida de energía disponible, en la ecuación general de energía:

Para el término h_L está definido como la pérdida de energía presente en el sistema, si se realizara la conexión parcial de dos manómetros Bourdon en una tubería donde pasa el fluido el manómetro P_1 indicaría una presión estática mayor que el manómetro P_2 , esto es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la longitud de la corriente 2.4.

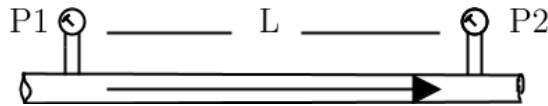


Fig. 2.4 Pérdida de energía por fricción

Ecuación de Darcy

La ecuación general de la pérdida de energía es conocida como la fórmula de Darcy:

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (2.12)$$

Donde:

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción (Nm/N)

L = Longitud de la corriente de flujo (m)

D = Diámetro de la tubería (m)

v = Velocidad promedio del flujo (m/s)

f = Factor de fricción (*adimensional*).

La ecuación de Darcy es válida para el cálculo de pérdida de energía debido a la fricción de un flujo laminar como turbulento de cualquier líquido en secciones rectilíneas y largas de tubos redondos. La diferencia entre los dos tipos de fluidos está en la evaluación del factor de fricción adimensional (f).

Factor de fricción

El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ($N_{R<4000}$) es función solo del numero de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ($N_{R>4000}$) es función del tipo de paredes de tubería.

Si el flujo es laminar ($N_{R<4000}$), el factor de fricción puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (2.13)$$

Cuando el flujo es turbulento ($N_{R>4000}$) el factor de fricción dependerá no solo del numero de Reynold si no además de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería (ε) comparada con el diámetro de la tubería (D) es decir ε/D .

En la Figura 2.5 se ilustran las irregularidades de la superficie interna de la tubería en relación al diámetro.

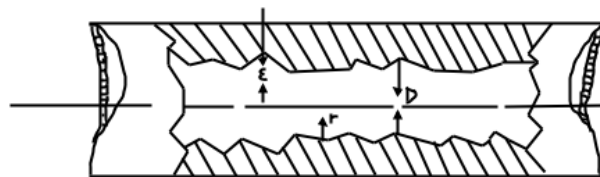


Fig. 2.5 Rugosidad Relativa

La siguiente ecuación permite el cálculo directo del valor del factor de fricción para un flujo turbulento:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (2.14)$$

Diagrama de Moody

El diagrama de Moody es una herramienta que permite determinar el valor de factor de fricción f para flujos turbulentos. Para la aplicación de este método se debe conocer los siguientes valores; el valor del Número de Reynolds (N_R), y la rugosidad relativa. Por lo tanto para esto son necesarios los datos del diámetro del interior de la tubería, el tipo de material del que está hecha la tubería, la velocidad del flujo, el tipo de fluido y su temperatura, a partir de los cuales se determinara la viscosidad del fluido.

Para el uso del diagrama de moody se deberá primero evaluar el número de Reynolds tal comportamiento deberá ser turbulento, a continuación se evalúa la rugosidad relativa, el valor de (ε) esta dado por el tipo de material de la tubería y es determinado por:

$$\text{Rugosidadrelativa} = \frac{D}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Se localiza el número de Reynolds en la abscisa del diagrama de Moody, se realiza la proyección vertical hasta alcanzar la curva para rugosidad relativa $\frac{D}{\varepsilon}$ y se toma la proyección hacia el lado izquierdo para leer el factor de fricción f .

Pérdida de energía debida a válvulas y accesorios

Cuando un fluido se encuentra en desplazamiento por una tubería recta, larga y con un diámetro constante, el comportamiento del fluido es uniforme al igual que su velocidad. Si el fluido es encontrado por un obstáculo de la tubería este se ve alterado en la dirección de corriente cambiando parcial o totalmente su configuración del flujo ocasionando turbulencia, este obstáculo generara una pérdida de energía mayor a la que se presenta en una tubería recta.

Ya que las válvulas y accesorios conectados a una línea de tubería alteran la configuración del flujo, produciendo una pérdida de presión adicional.

Los diversos diseños de las válvulas dificultan una clasificación completa de estas. Para la determinación de pérdida de energía las válvulas se clasifican por su resistencia al flujo ó aquellos que permiten el paso directo del fluido.

Los accesorios ó acoplamientos para conexión se clasifican en: de derivación, reducción, ampliación y desviación. Los accesorios como: tes, cruces, codos de salida lateral etc., pueden agruparse como accesorios de derivación. Estos pueden cambiar dirección y comportamiento del fluido.

Las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de velocidad del fluido, conforme el fluido va pasando por accesorios que expandan o realicen alguna contracción en alguna posición de la tubería de igual forma por el pase de una

válvula. Los valores experimentales de las pérdidas de energía se reportan de un coeficiente de resistencia K expresado en la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.16)$$

El coeficiente de resistencia es dimensional por la proporcionalidad que existe entre la pérdida de energía y la carga de velocidad, esto se presenta cuando el fluido pasa de una tubería pequeña a una más grande en diámetro interno, la velocidad se ve disminuida de manera considerada, lo que a su vez provoca la turbulencia del fluido y una pérdida de energía 2.6.

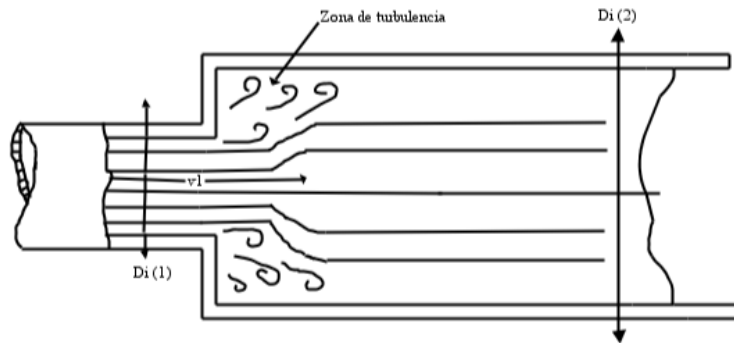


Fig. 2.6 Rugosidad Relativa

La ecuación hace referencia a las dos secciones de la tubería la sección más pequeña y la mas grande, respectivamente, para la ecuación los valores de K se relacionan con las velocidades que se obtienen experimentalmente.

Otro método para determinar el coeficiente de resistencia K es diferente para válvulas y acoplamiento. El valor de K se obtiene en la relación:

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) f_T \quad (2.17)$$

La resistencia de válvulas y acoplamiento esta expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería $\left(\frac{L_e}{D} \right)$, siendo la relación entre la longitud de una tubería recta del mismo diámetro nominal que el de la válvula, la cual tendría la misma resistencia que esta. El término para D dentro de la ecuación es el diámetro interior real de la tubería.

El factor de fricción f_T es la fricción presente en la conexión entre la válvula o acoplamiento, considerado que se encuentra dentro de la zona de turbulencia. Los valores para f_T varían según el tamaño de la tubería y la válvula, lo que hace que el valor del coeficiente de resistencia K varié.

2.4 Estado del arte

2.4.1 Simuladores

Actualmente existen softwares con licencia más completos que realizan el cálculo de pérdidas de carga de energía en tuberías por medio de una interfaz y permiten el diseño de un sistema hidráulico, el cálculo de cada uno de los accesorios que conforman el diseño, cálculos de transferencia térmica y análisis para distintos tipos de fluidos a diferentes temperaturas. Estos softwares cuentan con una base de información con datos de fluidos, equipos de diferentes materiales y especificaciones que permiten su amplia aplicación a diferentes tipos de sistemas de transferencia de fluidos. A continuación se presentan algunos de los softwares más completos que existen actualmente:

FLUIDFLOW

Es un software que permite el cálculo de pérdidas de carga en redes de tuberías. A través de su interfaz gráfica de usuario GUI, el usuario puede construir de forma rápida una red indicando de forma interactiva las características de los diferentes elementos que componen las tuberías; válvulas; condiciones de contornos, filtros, etc. Dispone de una extensa base de datos de fluidos, materiales, equipos, etc. El usuario puede customizar a su interés dicha base de datos. FLUIDFLOW se caracteriza por una gran velocidad de cálculo, robustez en el solver y alta precisión de resultados. Su campo de aplicación es extenso y diversificado ya que es aplicable en donde se utilice un sistema de transferencia por medio de tuberías y equipos de bombeo. [13].

L FLOW

Este software permite el cálculo de la pérdida de carga producida en líquidos al circular a través de tuberías circulares y sus accesorios. Dispone de base de datos para la selección del fluido, materiales de tubería y accesorios. Ofrece todos los resultados necesarios para que el diseñador pueda entender de que forma afecta cada uno de los parámetros al resultado final, proporcionando curvas, las cuales son una herramienta de gran utilidad a la hora de documentar un proyecto [14].

AutoPipe

Bentley AutoPipe es un software que permite el diseño y análisis de sistemas de tuberías, permite al usuario crear, modificar y revisar modelos de tuberías y estructuras con capacidad de análisis lineal y no lineal en condiciones estáticas y dinámicas como temperatura, viento, olas, boyas, sísmico, y cargas variables.

AutoPipe reúne las necesidades de las empresas de la industria química y petrolera. [15]

2.4.2 Trabajos de tesis

MANUAL PARA ENSAYO DE PERDIDAS DE ENERGIA EN ACCESORIOS DE TUBERIA DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA

Universidad de San Carlos de Guatemala (Facultad de Ingeniería)

Elaborado por: Fernando Ponce Victoria para obtener el grado en Ingeniería Civil.

El trabajo tiene como objetivo realizar un manual de prácticas de pérdidas de energía por fricción en tuberías y accesorios de PVC, esto direccionado a un equipo de tipo tablero que está constituido por un conjunto de tuberías y accesorios de PVC, realizar los cálculos teóricos aplicando las ecuaciones de pérdidas de energía para cada accesorio, llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos en los ensayo con los valores prácticos que se dan en los manuales de accesorios de tuberías. [16]

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE BANCO HIDRUILICO PARA DETERMINAR LAS PERDIDAS DE ENERGIA EN TUBERIAS CPVC

Universidad Católica de Colombia (Facultad de Ingeniería)

El trabajo elaborado en esta tesis tiene como objetivo diseñar y construir un banco hidráulico con tuberías CPVC de diámetros estándar en el mercado que permitan realizar prácticas de carga en el laboratorio de hidráulica, determinar la pérdida de presión entre dos puntos de una tubería, separados a una distancia constante, para las tuberías de CPVC en diámetros comerciales de 1/2, 3/4, 1 y 1 1/2 in, con un rango de temperatura entre 20 y 60°C .

El diseño de un manual que permita llevar a cabo las prácticas de laboratorio en pérdidas de presión y el uso correcto del banco hidráulico elaborado. [17]

AUTOMATIZACION DEL BANCO DE PERDIDAS DE LABORATORIO DE TURBOMAQUINARIA DE LA FACULTAD DE MECANICA

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Facultad de Ingeniería Mecánica)

El objetivo general la tesis referenciada es la construcción y automatización en la adquisición de datos en tiempo real de un banco de pérdidas de presión, el análisis de las características del material de las tuberías y accesorios en la construcción del

banco. El equipo diseñado será aplicado en prácticas de laboratorio en la facultad de ingeniería mecánica. [18]

3 Metodología

El presente capítulo presenta la metodología para el desarrollo del simulador y para las pruebas experimentales en el equipo *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores".

3.1 Definición del Sistema

El equipo *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores", se encuentra ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias "LOU" de la FCQeI de la UAEM.

El sistema de tuberías del equipo *H38D/EA* se encuentra ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQeI) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). La Figura 3.1 muestra el equipo *H38D/EA*, como se puede observar una electrobomba centrífuga (EB) succiona el fluido de trabajo contenido en un tanque de almacenamiento de Policloruro de Vinilo RE-(PVC) y lo descarga hacia el sistema de tuberías pasando por un rotámetro para controlar el flujo volumétrico en m^3/h (Q). El fluido de trabajo pasara por los accesorios y las tuberías con válvula o válvulas aperturadas, el fluido de trabajo retorna al tanque de almacenamiento teniendo un sistema de tuberías cerrado. El equipo cuenta con unos sensores de presión para obtener una diferencia de presión entre un punto y otro, estos valores se leen en el display que se encuentra en la parte superior izquierda del equipo.

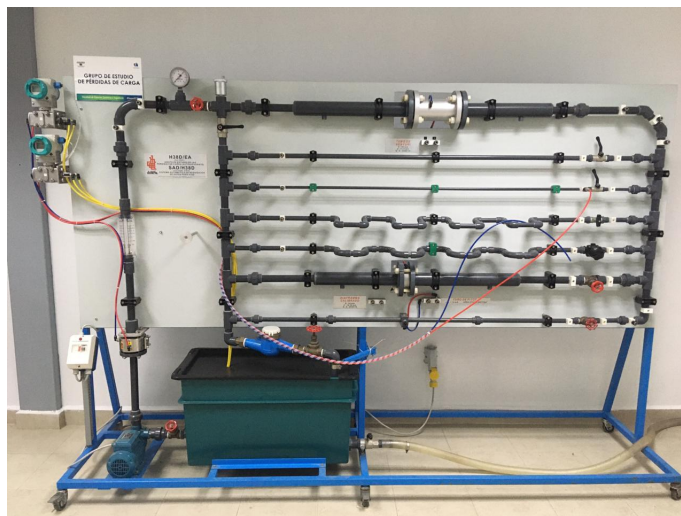


Fig. 3.1 Equipo *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores"

La Figura 3.2 muestra el diagrama del sistema de tuberías desarrollado para el simulador, en la figura se pueden observar todos los componentes del sistema y en la Tabla 1 se describen cada uno de esos componentes. Los sensores de presión se colocan entre los accesorios y/o tubería de acuerdo con la lectura que se quiera obtener, los puntos amarillos dentro del diagrama representan las posiciones de los sensores. Las tuberías tienen una longitud total de 1300 mm con diámetros nominales de $\frac{1}{2}$ in (L1) y 1 in (L2), la tubería 3 (L3) cuenta con 16 codos a 90° de radio estrecho y la tubería 4 (L4) cuenta con 16 codos a 90° de radio ancho y las válvulas (V1, V2, V3, V4, V5 y V6) son diferentes áreas de sección transversal.

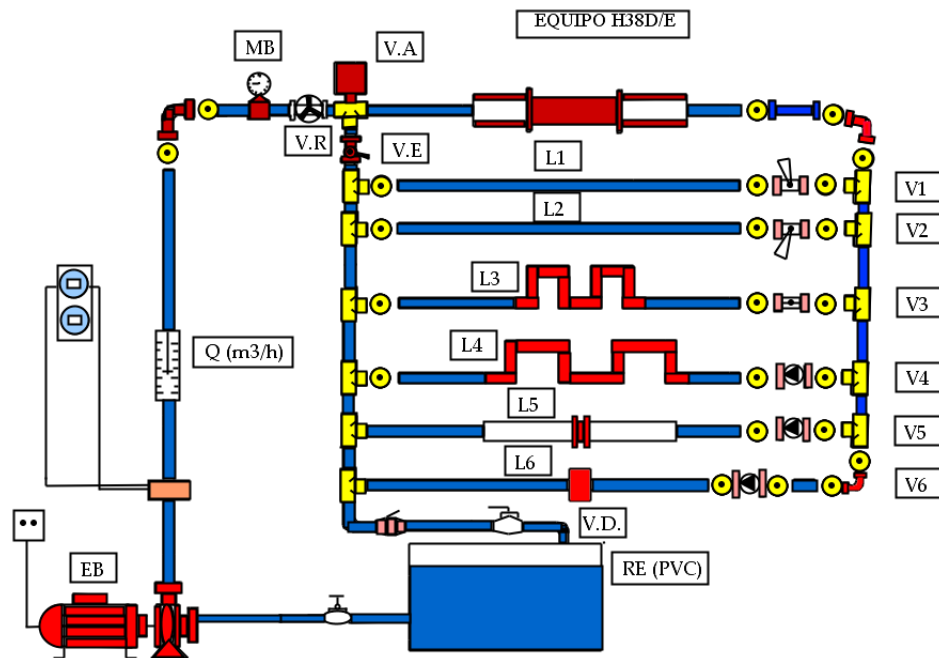


Fig. 3.2 Sistema de "Unidad de Pérdidas Menores"

Tabla 3.1 Componentes del equipo H38D/EA.

Componente	Descripción
RE (PVC)	Electrobomba de 0.45 kW, 4.5 A, 200 V CA, 50/60 Hz
EB	Recipiente de PVC capacidad de 100 L
Q	Medidor caudal principal de Q de brida calibrada, Caudal 0.2-3 m ³ /h
MB	Manómetro de Bourdon para medir la presión en el circuito principal (Caudal 0-6 Bar)
V.A	Válvula de alivio de presión

Componente	Descripción
V.E	Válvula de exclusión de válvulas y tubos de prueba
V.R	Válvula de presurización del equipo y de regularización del caudal Q
V1	Válvula de bola de 1/2 (sección Transversal 20mm ²)
V2	Válvula de bola de 3/8 (sección transversal 78.5 mm ²)
V3	Válvula lenticular (sección transversal 188.6 mm ²)
V4	Válvula de membrana (sección transversal 63 mm ²)
V5	Válvula de compuerta (sección transversal 505 mm ²)
V6	Válvula de aguja (sección transversal 113 mm ²)
L1	Tubo lineal de PVC Di 16 mm De 20 mm longitud 1300 mm
L2	Tubo lineal de PVC Di 9mm De 12 mm longitud 1300 mm
L3	Tubo de PVC Di 15.5 mm De 20 mm con codos a 90° de radio estrecho longitud 1300 mm
L4	Tubo de PVC Di 15.5 mm De 20 mm con codos a 90° de radio ancho longitud 1300 mm
L5	Tubo de Venturi Di 11.5 mm, De 50 mm S2
L6	Tubo de Pitot Di 14 mm S3 (efectivo 12.31 mm)

3.1.1 Procedimiento de Operación

La operación del equipo *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores" aplicado a este trabajo consta de la alineación correcta de válvulas para la operación del sistema de tuberías que se requiera analizar experimentalmente en el laboratorio de operaciones unitarias (LOU). El ajuste del sistema previo al estudio experimental es el definir un sistema a estudiar seleccionando una alineación que abarque ya sea solo una tubería o el alineamiento de la tubería con los accesorios para cada línea de estudio.

Para el inicio de operación del equipo *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores" se revisa cada una las condiciones de operación de los equipos que intervienen en el sistema.

- **El recipiente de PVC de capacidad de 100L.**

Para la operación del recipiente de PVC de capacidad de 100L, se utiliza como contenido mínimo un 80 % de su capacidad máxima, asegurando de que el recipiente no mostrara pérdida de fluido en las conexiones de alimentación y descarga del sistema permitiendo esto que la transición del fluido dentro del sistema sea constante sin presentar pérdida del fluido durante la operación. A continuación se muestran las condiciones operativas del fluido contenido en el recipiente de PVC de capacidad de 100L.

- **Electrobomba**

El arranque inicial de la electrobomba tipo centrifuga se utilizó bajo las condiciones estándar del equipo, suministrando energía al fluido para su transferencia a la entrada del sistema.

- **Medidor de caudal principal y Válvula de presurización del equipo y regularizadora del caudal.**
- **Manómetro de Bourdon que mide la presión en el circuito principal.**

Una vez seleccionado el caudal de operación a utilizar en una línea de estudio se realiza la lectura de presión que presenta el equipo *H38D/EA* "Unidad de Pérdidas Menores" a la entrada del sistema de tuberías y accesorios ya que una sobre-presión del equipo puede dañar las conexiones del sistema y el funcionamiento de la electrobomba, las condiciones de operaciones únicas para este equipo es mantener siempre la apertura de la Válvula de presurización del equipo y regularizadora del caudal abierto a $0.5m^3/h$ como mínimo de operación.

A continuación se muestran las propiedades del fluido de trabajo y las condiciones operativas del fluido contenido en el recipiente de PVC.

Para el arranque del sistema de circulación del equipo *H38D/EA*, el usuario deberá realizar la alineación de alimentación y control del flujo del sistema para poder iniciar con las pruebas en el equipo, como parte importante de la operación se deberá conocer cada uno de los componentes del sistema.

3.2 Programación con interfaz gráfica del sistema de tuberías H38D/EA

Una vez definido el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio de pérdidas de carga se define y construye para el equipo *H38D/EA*.

Las siguientes consideraciones son utilizadas en el modelo:

- El estudio es realizado bajo condiciones de estado estacionario.
- Se consideraron dos tipos de flujo, laminar y turbulento con número de reynolds mayor o igual a 4000 para flujo turbulento o menor a 4000 como flujo laminar.

La figura 3.3 muestra el diagrama de flujo para la programación del simulador desarrollado en este trabajo.

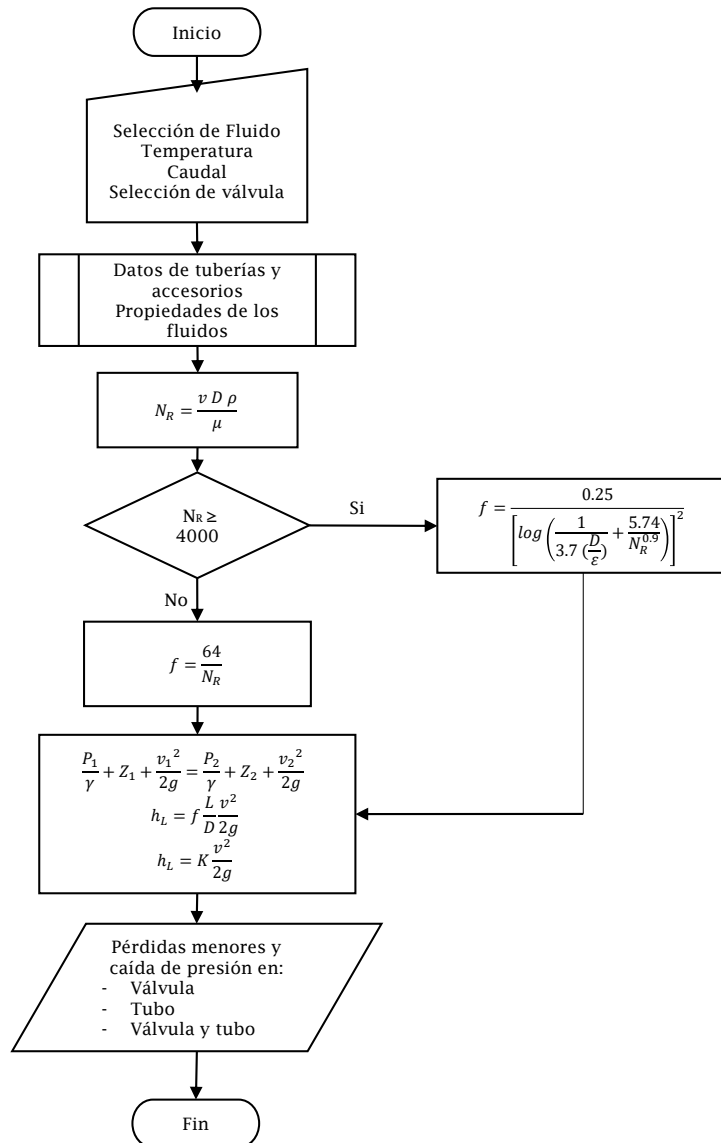


Fig. 3.3 Algoritmo para el cálculo de pérdidas de energía en el equipo H38D/EA

Las propiedades fisicoquímicas de los fluidos se obtuvieron de la base de datos de Refprop para matlab, mientras que los coeficientes de resistencias de los diferentes

accesorios se anexaron mediante una base de datos del manual de usuario del equipo H38D/EA “Unidad de Perdidas Menores”.

Definición de funciones en el modelo programado:

- $N_R = (Fluido, T)$
- Turbulento $f = (N_R, Tubería)$
- Laminar $f = (N_R, Tubería)$
- Pérdida por fricción $h_L = (f, Tubería)$
- Pérdida por accesorio $h_L = (accesorio, Tubería)$

Ecuación general de conservación

$$Entrada + Generación - Salida - Consumo = Acumulación \quad (3.1)$$

El algoritmo de cálculo adecuado para el equipo H38D/EA fue programado empleando la interfaz gráfica de usuario (GUIDE) del programa de cómputo MATLAB, el cual fue seleccionado dadas las facilidades que ofrece para la creación de pantallas amigables e intuitivas lo cual hace posible el empleo del programa a usuarios con poco conocimiento en computación. La Figura 3.4 muestra la pantalla principal del simulador.

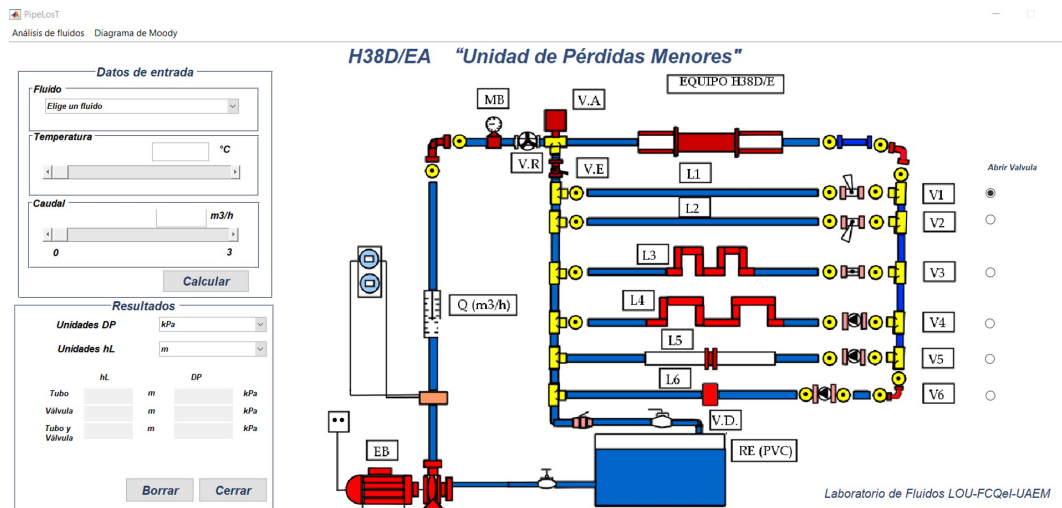


Fig. 3.4 Pantalla principal del simulador del equipo H38D/EA.

La pantalla principal cuenta con una sección de datos de entrada donde el usuario puede elegir entre las opciones del menú desplegable el tipo de fluido a estudiar (Figura 3.13 (1)). El usuario ingresa de forma manual o mediante la barra desplazable la temperatura a la cual el fluido ingresa a sistema de tuberías, dentro de un rango de 10°C a 50°C (Figura 3.13 (2)) y el caudal a la que el fluido estará

ingresando al sistema de tuberías, con un límite de alimentación de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 3.13 (3)). El usuario deberá elegir en la parte derecha del diagrama principal la válvula por donde el fluido pasará con las condiciones antes seleccionadas (Figura 3.6), una vez seleccionado todas las condiciones de entrada del fluido y su línea de estudio se debe seleccionar la opción de calcular (Figura 3.7 (5)) y los resultados se verán reflejado en el apartado de resultados como se muestra en la Figura 3.7.

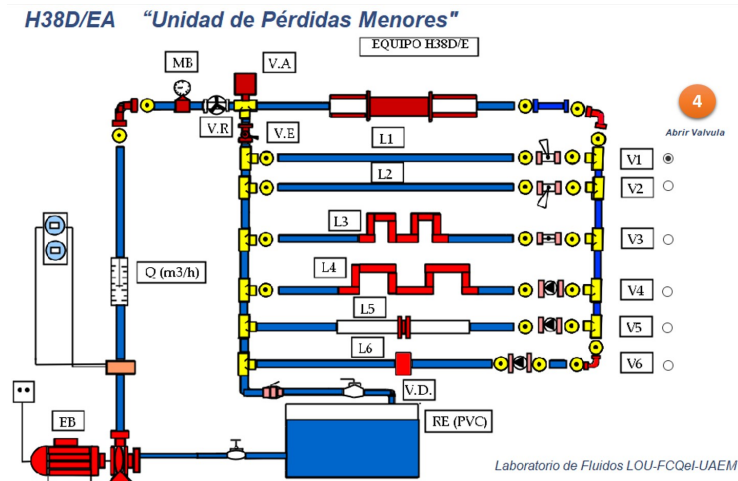
Figure 3.5 consists of two side-by-side screenshots of a software interface titled "Datos de entrada".

Screenshot (a) shows a list of fluids under the heading "Fluido". The list includes: Agua, Etanol (highlighted), Pentano, Hexano, Heptano, Octano, Nonano, Decano, Dodecano, and Ciclohexano. A "Calcular" button is at the bottom.

Screenshot (b) shows the same interface with "Agua" selected in the "Fluido" dropdown. The "Temperatura" is set to 19 °C and the "Caudal" is set to 1.5 m³/h. A "Calcular" button is at the bottom.

(a) Selección de fluido

(b) Establecer temperatura y caudal

Fig. 3.5 Datos de entrada**Fig. 3.6** Selección de válvula

(a) Opción calcular

(b) Resultados

Fig. 3.7 Pantallas de datos y resultados

3.3 Validación del modelo matemático

Las pruebas de validación en la ingeniería de software son el proceso de revisión que verifica que el sistema de software producido cumple con las especificaciones y las necesidades de los usuarios. Se trata de evaluar el sistema al final del desarrollo para determinar si satisface las condiciones iniciales.

3.3.1 Diseño de pruebas experimentales

La Tabla 3.2 indica el monitoreo de la caída de presión en cada experimento (ΔP) para posteriormente ser comparada con los valores obtenidos bajo las mismas condiciones de operación en el simulador, también la tabla compara las pérdidas menores (h_L) para cada experimento.

Tabla 3.2 Tabla de llenado

		Experimental		PipeLoss		
Clave de prueba	de	ΔP (kPa)	h_L (m)	ΔP (kPa)	h_L (m)	Error (%)

En la Tabla 3.3 se describe **la clave de prueba** experimental para cada uno de los componentes del sistema de tuberías del equipo *H38D/EA* “Unidad de Pérdidas Menores”. Para cada tubería y para cada válvula se determino de manera experimental la caída de presión, con el valor experimental se procedio a calcular

de manera analítica la pérdida de energía por fricción en el caso de tuberías y la pérdida de energía menor en las válvulas y codos con las ecuaciones 2.12 y 2.16.

Tabla 3.3 Condiciones de operación para las pruebas experimentales

Clave de prueba	Descripción
V1	Válvula de bola de 1/2 (sección Transversal $20mm^2$)
V2	Válvula de bola de 3/8 (sección transversal $78.5mm^2$)
V3	Válvula lenticular (sección transversal $188.6mm^2$)
V4	Válvula de membrana (sección transversal $63mm^2$)
V5	Válvula de compuerta (sección transversal $505mm^2$)
V6	Válvula de aguja (sección transversal $113mm^2$)
L1	Tubo lineal de PVC D_i 16mm D_e 20mm longitud 1300mm
L2	Tubo lineal de PVC D_i 9mm D_e de 12mm longitud 1300mm
L3	Tubo de PVC D_i 15.5mm D_e 20mm con codos a 90° de radio estrecho longitud 1300mm
L4	Tubo de PVC D_i 15.5mm D_e 20mm con codos a 90° de radio ancho longitud 1300mm

Válvula de bola 1/2 in , 3/8 in

Este tipo de válvula no ofrece una regulación de flujo preciso, su ventaja permite la circulación del flujo directo con una pérdida de carga bastante reducida.

Válvula de membrana o diafragma

Se utilizan para el corte o estrangulación de un fluido con partículas en suspensión por medio de una membrana flexible, las partes mecánicas no tiene contacto directo con el fluido esto evita cualquier contaminación hacia el exterior, estas válvulas son empleadas en bajas presiones y en fluidos densos.

Válvula de compuerta

Se utilizan principalmente para permitir o no el paso de un fluido (*ON – OFF*), por su diseño deberá estar cerrado o abierto en su totalidad para que el asiento y

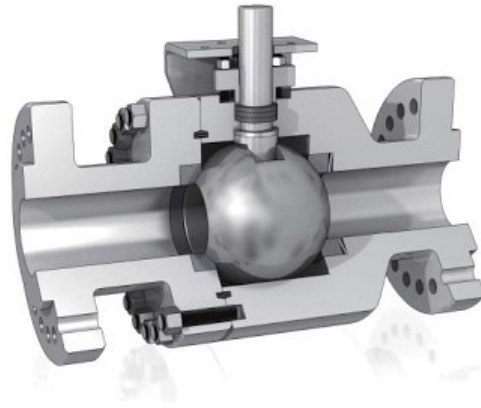


Fig. 3.8 Válvula de bola

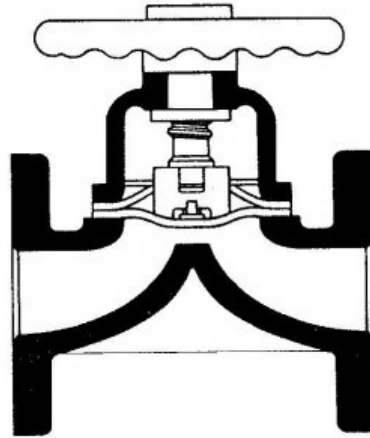


Fig. 3.9 Válvula de membrana

la cuña no se desgasten por el paso del fluido. Es de difícil cierre y apertura por lo que no sirve como un control de flujo por lo que es utilizado en servicios generales como: aceites, gas, petróleo etc.

Válvula de aguja

Es llamada así por el vástago cónico que hace de obturador sobre un orificio de pequeño diámetro en relación al diámetro nominal de la válvula, el desplazamiento del vástago es lento y el hecho de que gira un gran número de vueltas la sección de paso del fluido es mínima lo que convierte a esta válvula en una buena reguladora de caudal.

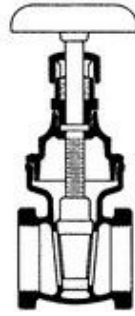


Fig. 3.10 Válvula de compuerta

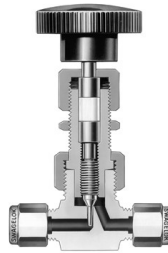


Fig. 3.11 Válvula de aguja

Válvula lenticular

La válvula lenticular simple permite maniobras frecuentes con un par muy reducido. De diseño robusto, garantiza la ausencia de zonas de retención de fluido ofreciendo a la vez excelentes prestaciones mecánicas y permite el uso rudo en tuberías de alta maniobra operativa.

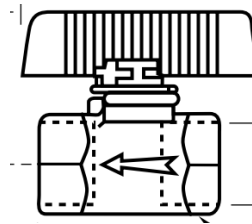


Fig. 3.12 Válvula de lenticular

Codos de 90°

El codo de 90° es un tipo de acoplamiento que se instala entre las dos longitudes de un tubo para permitir un cambio de dirección. La pérdida de energía es proporcional a la carga de velocidad del fluido que pasa por el codo, por lo general

los valores experimentales de las pérdidas de energía se reportan en términos de su coeficiente de resistencia K .

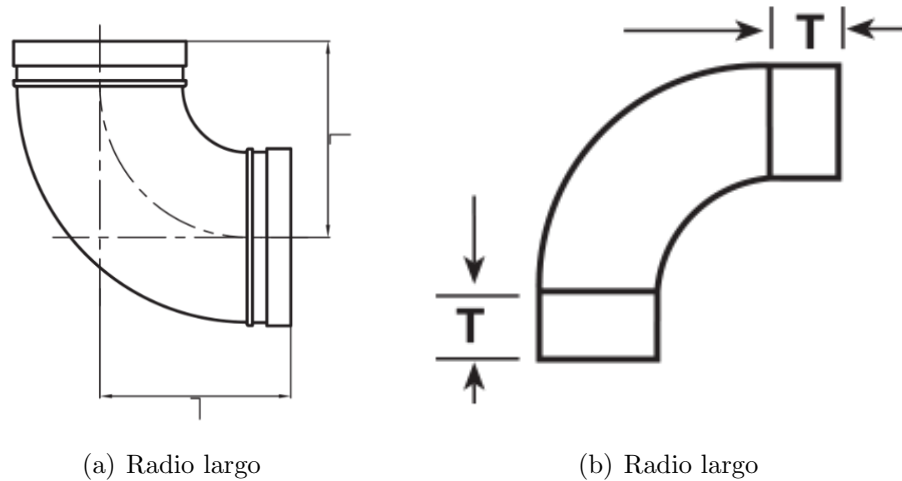


Fig. 3.13 Codo de 90°

La Tabla 3.4 muestra las condiciones de operación para los experimentos, mientras que la Tabla 3.5 muestra las propiedades del fluido de trabajo a la temperatura de operación.

Tabla 3.4 Condiciones de Operación

Fluido	Agua
Caudal	$1\text{m}^3/\text{h}$
Temperatura	19°

Tabla 3.5 Propiedades del fluido

Propiedad	Cantidad
Peso específico	9.78 kN/m^3
Densidad	998.22 kg/m^3
Viscosidad	0.01 $Pa\cdot s$

La Tabla 3.7 muestra los resultados de la caída de presión ΔP y de la pérdida menor h_L de los experimentos y así como de los resultados obtenidos con el simulador, en la misma tabla se muestran los resultados del error relativo de los resultados de las pérdidas de energía calculados con la ecuación:

$$Error_{Rel} = \frac{Error_{Abs}}{Valor_{Real}} \quad (3.2)$$

Tomando como valor real, el valor experimental.

$$Error_{Abs} = |Valor_{Real} - Valor_{Sim}| \quad (3.3)$$

La prueba experimental con clave V3 presenta el error relativo más alto, dicho experimento corresponde a la pérdida menor por fricción en la válvula de compuerta (sección transversal 505 mm^2). Es importante mencionar que para los cálculos en el simulador se introdujeron los valores de las constantes del coeficiente de resistencia para cada válvula reportados en el manual de operación del equipo H38D/EA.

Tabla 3.6 Comparación de las pérdidas menores en las válvulas del equipo H38D/EA y del simulador

Clave de prueba	Equipo H38D/EA		Simulador		Error %
	ΔP kPa	h_L m	ΔP kPa	h_L m	
V1	6.20	0.70	7.01	0.72	1.53
V2	27.33	2.79	23.31	2.38	14.71
V3	16.77	1.72	19.31	1.97	14.85
V4	132.29	12.10	125.19	12.78	5.62
V5	0.00175	0.00017	0.00151	0.00015	14.08
V6	52.82	5.39	47.44	4.84	10.20

Tabla 3.7 Comparación de las pérdidas menores por fricción en los tubos del equipo *H38D/EA* y del Simulador

Clave de prueba	Equipo <i>H38D/EA</i>		Simulador		Error %
	ΔP <i>kPa</i>	h_L <i>m</i>	ΔP <i>kPa</i>	h_L <i>m</i>	
L1	3.15	0.32	4.01	0.41	27.95
L2	38.56	3.93	30.51	3.11	20.75
L3	24.11	2.46	26.66	2.72	10.36
L4	17.91	1.81	21.18	2.16	18.03

4 Resultados

En la sección de resultados se analizan las propiedades de diferentes fluidos y las pérdidas de energía en las diferentes tuberías y accesorios en función de la temperatura. Para el análisis se utilizó el simulador desarrollado en este trabajo. Los fluidos analizados son los que se encuentran en la base de datos de propiedades de transporte y termodinámica de fluidos de referencia NIST (REFPROP) versión libre para Matlab.

4.1 Análisis de los alcanos

Los hidrocarburos son sustancias que están formadas sólo de carbono e hidrógeno. Un alcano es un hidrocarburo que sólo contiene enlaces sencillos $C - H$. Los alcanos son la clase más simple y menos reactiva de todos los compuestos orgánicos, ya que sólo contienen carbono e hidrógeno y no tiene grupos funcionales. Los cicloalcanos son una clase especial de hidrocarburos que forman anillos, como el ciclohexano. La Tabla 4.4 muestra la fórmula, el punto de ebullición y la densidad a $20^{\circ}C$ de 7 alcanos con estructura lineal.

Tabla 4.1 Propiedades de los alcanos

Alcano	Número de carbonos	de	Fórmula	Punto de ebullición ($^{\circ}C$)	Densidad (kg/m^3)
Pentano	5		C_5H_{12}	36	630
Hexano	6		C_6H_{14}	69	660
Heptano	7		C_7H_{16}	98	680
Octano	8		C_8H_{18}	126	700
Nonano	9		C_9H_{20}	151	720
Decano	10		$C_{10}H_{22}$	174	730
Dodecano	12		$C_{12}H_{26}$	216	750

Los alcanos se utilizan principalmente como combustibles, disolventes y lubricantes. Se dice que son hidrofóbicos ya que no se disuelven en el agua. Son buenos lubricantes y protectores de los metales, ya que evitan que el agua haga contacto con la superficie del metal y provoque su corrosión. Los alcanos tienen densidades aproximadas de $700 kg/m^3$, comparadas con la densidad de $1000 kg/m^3$ del agua.

Los puntos de ebullición aumentan ligeramente a medida que aumenta el número de átomos de carbono y por tanto, las masas moleculares. $C_5 - C_8$ estos cuatro alcanos son líquidos volátiles y sus isómeros del pentano, hexano, heptano y octano son los constituyentes principales de la gasolina. $C_9 - C_{12}$ son alcanos líquidos de punto de ebullición más alto y algo viscoso. Forman parte del queroseno, combustible de los aviones, y del gasoil, combustible de los motores diésel.

Los resultados de la Tabla 4.2 se obtuvieron a 19°C y 1 atm de presión, en 1.3 m de tubería de PVC con 0.0160 de diámetro interno y un flujo volumétrico de $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$. Al aumentar el número de carbonos, aumenta la densidad y aumenta la viscosidad. El número de Reynolds es más sensible a la viscosidad que a la densidad, ya que es inversamente proporcional a este número dimensional como se puede ver en la ecuación 2.3.3, mientras que el factor de fricción y por lo tanto las pérdidas menores por fricción aumentan conforme disminuye el número de Reynolds.

Tabla 4.2 Resultados de las propiedades y parámetros de los alcanos

Alcano	Densidad (kg/m^3)	Viscosidad (Pas)	N_R	f	h_L (m)
Pentano	626.73	2.29E-04	90572.49	1.83E-02	0.33
Hexano	660.28	3.16E-04	69351.07	1.94E-02	0.35
Heptano	684.66	4.16E-04	54544.48	2.04E-02	0.36
Octano	703.10	5.49E-04	42474.77	2.16E-02	0.38
Nonano	718.82	7.08E-04	33673.14	2.28E-02	0.41
Decano	731.19	9.28E-04	26138.50	2.42E-02	0.43
Dodecano	750.18	1.52E-03	16398.74	2.72E-02	0.48

En el simulador se variaron las propiedades de los alcanos en un rango de temperaturas de $19 - 50^\circ\text{C}$, esto para trabajar los fluidos en estado líquido a temperaturas de transporte por tuberías en diferentes industrias. La Figura 4.1 muestra el comportamiento de la densidad y la viscosidad, ambas propiedades disminuyen conforme aumenta la temperatura para la densidad en un rango de $(780 - 630) \text{ kg}/\text{m}^3$ y la viscosidad en un rango de $(15 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}) \text{ Pas}$, teniendo con mayor densidad siempre al ciclohexano y con menor densidad el hexano, y para la viscosidad el dodecano muestra los valores más altos, mientras que el hexano los más bajos.

Las propiedades analizadas anteriormente influyen directa e inversamente en el cálculo del N_R y este a su vez en el cálculo del factor de fricción. La Figura 4.2

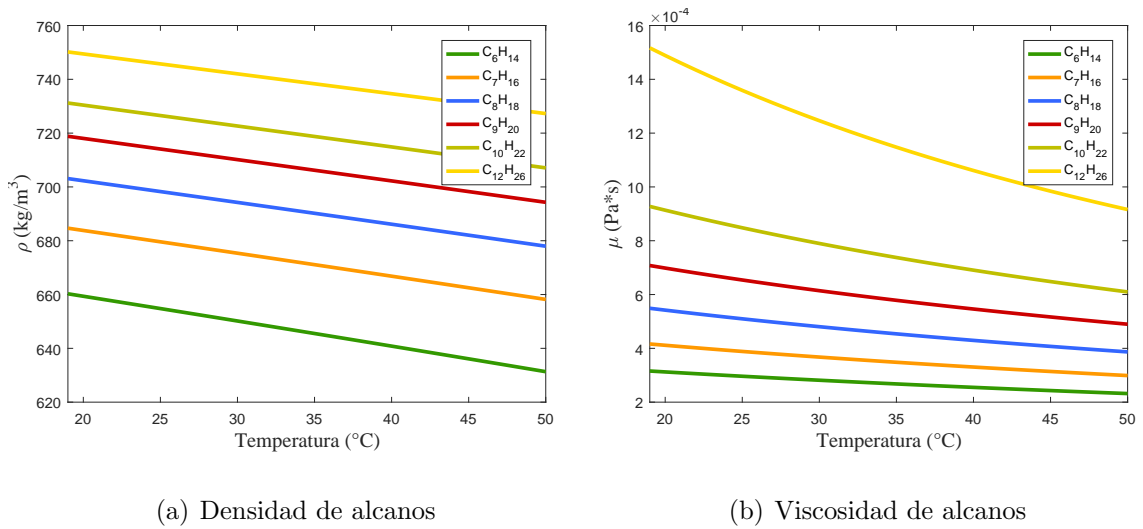


Fig. 4.1 Propiedades fisicoquímicas para los alcanos

(a) muestra el comportamiento del Número de Reynolds en el mismo rango de temperaturas, con un valor máximo y mínimo de 85000 y 18000 respectivamente todos los valores en regimen turbulento. Posteriormente con la ecuación 2.3.3, se calcula el factor de fricción obteniendo los resultados de la Figura 4.2 (b) con valor máximo y mínimo de 0.027 y 0.017 respectivamente.

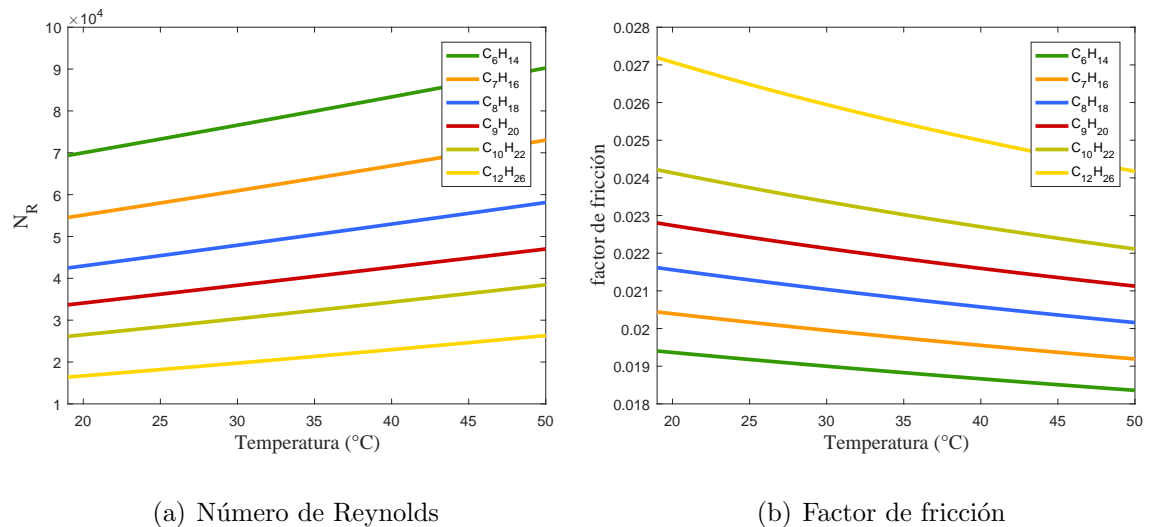


Fig. 4.2 Parámetros para el cálculo de pérdidas menores por fricción para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$

La Figura 4.3 muestra los resultados de las pérdidas por fricción de los diferentes alcanos para el rango de temperaturas establecido, detectando al fluido con mayor pérdida de energía y al de menor pérdida de energía, dodecano y hexano respectivamente. De manera general el análisis con el simulador desarrollado en este trabajo podemos decir que al disminuir en número de carbonos en el alcano y al aumentar la temperatura disminuye la pérdida de energía por fricción del fluido y al aumentar el número de carbonos con menor temperatura la pérdida por fricción aumenta.

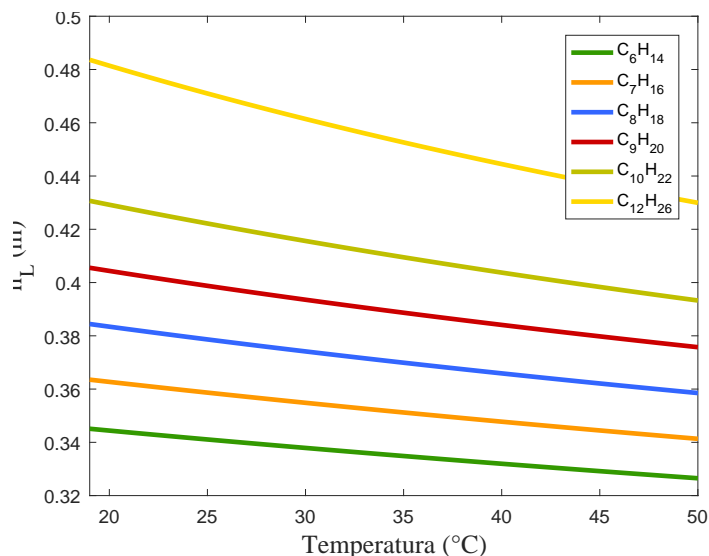


Fig. 4.3 Pérdidas de energía por fricción de diferentes alcanos para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$

4.2 Análisis del hexano, isohexano y ciclohexano

El siguiente análisis consiste en comparar las propiedades (densidad y viscosidad), el número de Reynolds, el factor de fricción y la pérdida de energía por fricción del hexano, del isohexano y del ciclohexano. La Tabla 4.4 muestra la fórmula, el punto de ebullición y la densidad a 20°C del hexano, isohexano y ciclohexano.

La diferencia de las propiedades comparadas entre el hexano y el isohexano depende no solo de los átomos que los componen sino también de la forma en que están enlazados entre ellos (conectividad) y de la relación espacial que guardan entre sí, este caso el hexano y el isohexano, dos compuestos de igual fórmula molecular (C_6H_{14}) pero con propiedades totalmente distantes, estas diferencias pueden explicarse a partir de sus estructuras, pues en tanto el hexano presenta una estructura de cadena lineal y una mayor área superficial que le da un punto

de ebullición más elevado que su isómero el isohexano, los alcanos ramificados tiene un punto de ebullición más bajo porque son mas esféricos que los alcanos de cadena recta, presenta menor área superficial y en consecuencia menores fuerzas de dispersión. El ciclohexano es un hidrocarburo saturado con mayor densidad y punto de ebullición.

Tabla 4.3 Propiedades del ciclohexano

Alcano	Número de carbonos	de Fórmula	Punto de ebullición ($^{\circ}C$)	Densidad (kg/m^3)
Hexano	6	C_6H_{14}	69	660
Isohexano	6	C_6H_{14}	60	653
Ciclohexano	6	C_6H_{12}	81	779

La Figura 4.4 muestra el comportamiento de la densidad y de la viscosidad en función de la temperatura para el hexano y sus isómeros, ambas propiedades disminuyen conforme aumenta la temperatura, teniendo con mayor densidad y viscosidad siempre al ciclohexano y con menor densidad y viscosidad al isohexano.

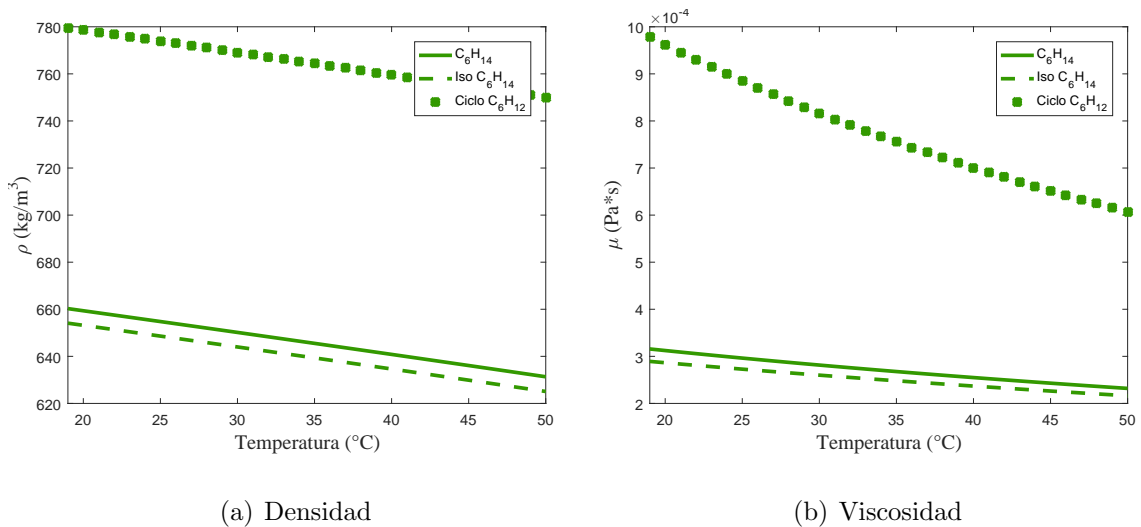


Fig. 4.4 Propiedades fisicoquímicas

El cálculo de las propiedades de los fluidos se utilizan para el cálculo del número de Reynolds y poder conocer el regimen de flujo, posteriormente se calcula el factor de fricción que servira para conocer la pérdida de energía por fricción en un

sistema de tuberías que transporte alguno de estos fluidos. En las Figuras 4.5 y 4.6 se puede observar que el ciclohexano presenta la mayor pérdida de energía por fricción mientras que el isohexano presenta las menores, al igual que en los alcanos a mayor temperatura menor pérdida de energía por la pérdida de fuera viscosa durante el trayecto del fluido.

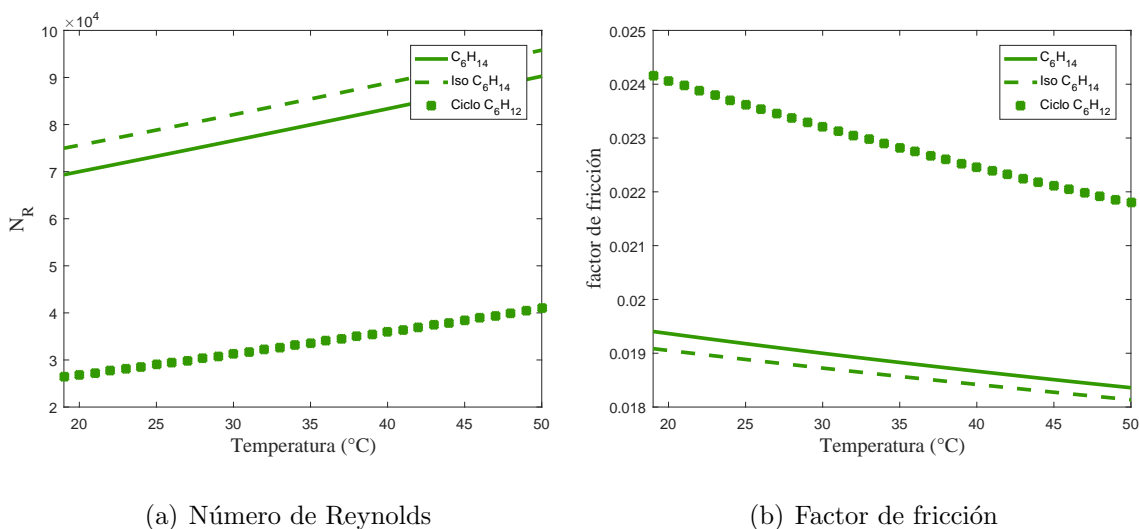


Fig. 4.5 Parámetros para el cálculo de pérdidas menores por fricción para un sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$

4.3 Análisis de los alcoholes

Los alcoholes son compuestos útiles en la industria y en el hogar. El alcohol etílico se encuentra en las bebidas alcohólicas, los cosméticos, en pinturas y en preparados farmacéuticos. El alcohol metílico (alcohol de madera) se utiliza como combustible y disolvente. La Tabla 4.4 muestra la fórmula, el punto de ebullición y la densidad a $20^{\circ}C$ del agua, metanol y etanol.

Tabla 4.4 Propiedades de los alcoholes

Alcano	Número de carbonos	Fórmula	Punto de ebullición ($^{\circ}C$)	Densidad (kg/m^3)
Agua	0	H_2O	100	998
Metanol	1	CH_3OH	65	792

Especie química	Número de carbonos	de Fórmula	Punto de ebullición ($^{\circ}C$)	Densidad (kg/m^3)
Etanol	2	CH_3CH_2OH	78	790

El agua y los alcoholes tienen propiedades similares porque contienen grupos hidroxilo que pueden formar enlaces de hidrógeno. Los alcoholes forman enlaces de hidrógeno con el agua y varios de los alcoholes de masa molecular más baja son miscibles (solubles en cualquier proporción) con el agua. De forma similar, los alcoholes son mucho mejores disolventes que los hidrocarburos para las sustancias polares. Se dice que el grupo hidroxilo es hidrofílico, porque tiene afinidad por el agua y por otras sustancias polares (el metanol y etanol son miscibles en agua, la solubilidad en agua disminuye a medida que el grupo alquilo aumenta de tamaño).

El metanol es uno de los disolventes industriales más comunes; es barato, menos tóxico que los disolventes halogenados, y disuelven a una gran variedad de sustancias polares y no polares. El metanol también es una sustancia de partida para la obtención de una amplia variedad de éteres metílicos, ésteres metílicos y otros compuestos en formulación de plásticos, medicamentos y otros productos industriales. El metanol es un buen combustible para los motores de combustión interna, tiene un alto índice de octano, las emisiones son poco contaminantes y su inflamabilidad es más baja, pero su contenido energético es menor. El etanol es un disolvente excelente, de baja toxicidad y barato de producir. Igual que el metanol, el etanol es un buen combustible para los motores, con ventajas y desventajas parecidas a las del metanol.

En este análisis se comparan las propiedades fisicoquímicas (densidad y viscosidad) de dos alcoholes: el metanol (CH_3OH) y el etanol (CH_3CH_2OH), a su vez son comparados con el agua (H_2O). La Figura 4.7 muestra la densidad (*a*) y la viscosidad (*b*) de estos fluidos, en un rango de temperaturas de $(19 - 50)^{\circ}C$, donde se puede observar que las densidades de los alcoholes son muy parecidas, con valores entre $750 - 800 kg/m^3$, mientras que la del agua se encuentra con valores de $980 - 1000 kg/m^3$. La viscosidad de los alcoholes es muy diferente, el metanol presenta menores valores de esta propiedad en un rango de 4×10^{-4} a 6×10^{-4} , mientras que los valores más altos los presenta el etanol en un rango de 8×10^{-4} a 12×10^{-4} , el agua muestra valores entre estos dos alcoholes en un rango de 6.5×10^{-4} a 10.5×10^{-4} , de manera general podemos decir que el metanol es menos viscoso que el agua y el etanol más viscoso que el agua. Ambas propiedades densidad y viscosidad disminuyen conforme se aumenta la temperatura del fluido, condición general para los fluidos en estado líquido.

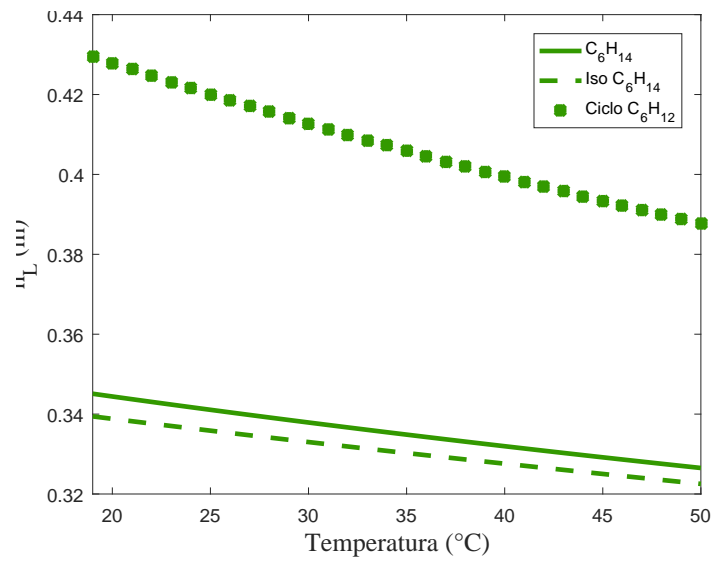
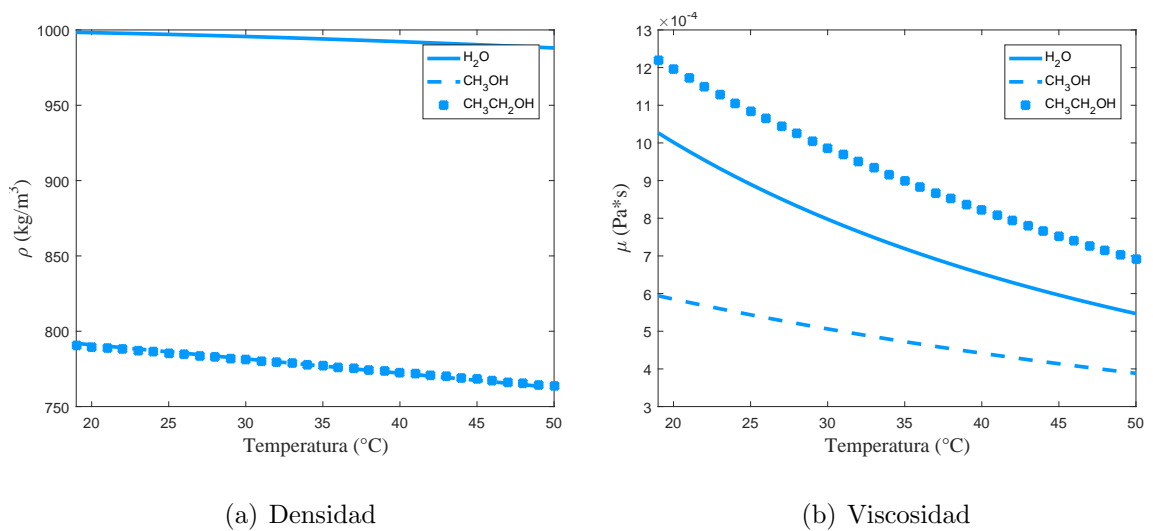


Fig. 4.6 Perdidas menores por fricción para una sección tubular para un $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$



(a) Densidad

(b) Viscosidad

Fig. 4.7 Propiedades fisicoquímicas para los alcoholes

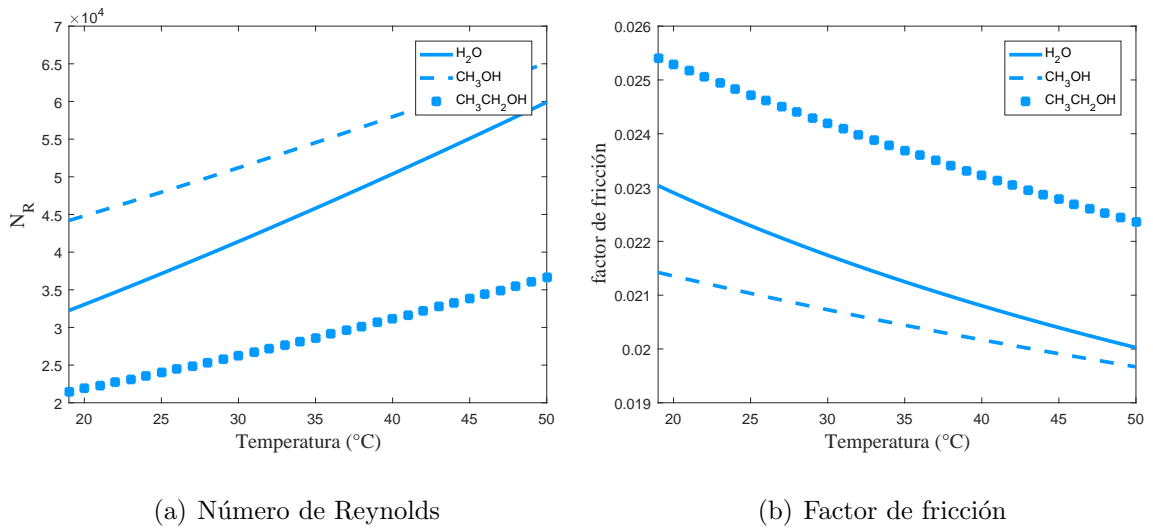


Fig. 4.8 Parámetros para el cálculo de pérdidas menores por fricción para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$

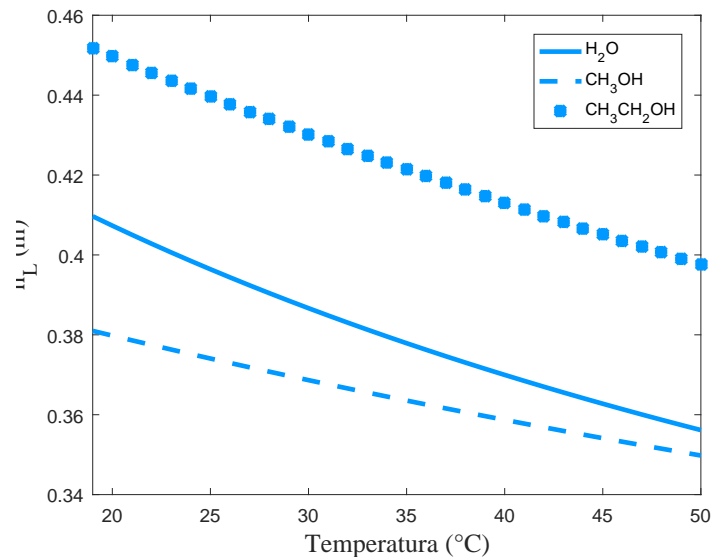


Fig. 4.9 Pérdidas menores por fricción para una sección tubular de $D_i = 16 \text{ mm}$, $L = 1300 \text{ mm}$ y $Q = 1.5 \text{ m}^3/h$

5 Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo se muestran las conclusiones del trabajo de tesis así como algunas recomendaciones a partir de los resultados obtenidos.

5.1 Conclusiones

- Se modelaron las ecuaciones para el cálculo de pérdidas menores por fricción y accesorios en el sistema de tuberías *H38D/EA*, utilizando el lenguaje “m” de MATLAB y una pantalla intuitiva programa en la interfaz gráfica de usuario de MATLAB.
- Se realizaron pruebas experimentales en el equipo de pérdidas menores del laboratorio de fluidos *H38D/EA* para el agua y se compararon los resultados con los obtenidos en el simulador desarrollado en este trabajo, obteniendo una discrepancia máxima con un error relativo de 14.85 % para la válvula lenticular.
- Mediante el simulador desarrollado se realizaron varios estudios para los diferentes fluidos, se analizó para cada fluido sus propiedades fisicoquímicas (densidad y viscosidad) en función de la temperatura y también se analizó el comportamiento del número de Reynolds, el factor de fricción y la pérdida de energía.
- Se cuantificó el error relativo, tomando como valores reales los obtenidos en el equipo *H38D/EA* y los simulados del simulador desarrollado en este trabajo.

5.2 Recomendaciones

- Instrumentar y controlar las variables, flujo, presión y temperatura del equipo *H38D/EA*.
- Incluir simulación dinámica en el simulador desarrollado en este trabajo.
- Integrar otros fluidos que se utilicen ampliamente en la industria de procesos químicos, para su estudio de propiedades y pérdidas de energía.

- Diseñar y construir un sistema de tuberías con materiales metálicos y comparar los resultados con los obtenidos con el sistema de PVC.

Bibliografía

- [1] Ronald Darby, Ron Darby, and Raj P Chhabra. *Chemical engineering fluid mechanics, revised and expanded*. CRC Press, 2001.
- [2] MC Potter and DC Wiggert. *Mecánica de fluidos, 3ra. Edición, Thomson Learning, México*, 2007.
- [3] William Graebel. *Advanced fluid mechanics*. Academic Press, 2007.
- [4] James W Daily and Donald RF Harleman. *Dinámica de los fluidos*. Editorial F. Trillas SA, 1969.
- [5] Robert E Wilson, WH McAdams, and M Seltzer. The flow of fluids through commercial pipe lines. *Industrial & Engineering Chemistry*, 14(2):105–119, 1922.
- [6] Richard W Greene. *Válvulas: selección, uso y mantenimiento*. Technical report, 1988.
- [7] F Holland and R Bragg. *Fluid flow for chemical and process engineers*. Elsevier, 1995.
- [8] Claudio Mataix. *Mecánica de fluidos. History Channel. Documental Ingeniería Hidráulica*, page 579, 1986.
- [9] Egon Krause. *Fluid Mechanics I*. Springer, 2005.
- [10] PROGRAMA DE ESTUDIO DE ASIGNATURA. *Mecanica de fluidos*. 2011.
- [11] Irving H Shames, Jaime Moneva Moneva, and Sebastián Pérez Crusells. *La mecánica de los fluidos*, volume 2. McGraw-Hill Colombia, 1995.
- [12] Robert L Mott. *Mecanica de Fluidos 6/e*. Pearson educación, 2006.
- [13] Simulaciones y proyectos knowledge from simulation. FLUIDFLOW ® pressure drop software, 1999.
- [14] Home Herramientas de Ingenieria. LFLOW ® calculo de perdida de carga en tuberia y accesorios para liquidos, 1999.

-
- [15] Bentley. AutoPIPE [®] análisis rápidos y probados, 1999.
- [16] F Ponce Victoria. *Manual para ensayo de pérdidas de energía en accesorios de tubería del laboratorio de hidráulica*. PhD thesis, Tesis Título Profesional de Ingeniero). Universidad de San Carlos de . . . , 2006.
- [17] Omar Ramírez Montoya. Diseño y construcción de banco hidráulico para determinar las pérdidas de energía en tuberías. 2017.
- [18] Marco Antonio Ordoñez Viñán, Quisnancela Salazar, and Karina Gissel. Automatización del banco de pérdidas del laboratorio de turbomaquinaria de la facultad de mecánica. B.S. thesis, 2013.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMA T4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 17 de abril de 2023

DR. JORGE A. DOMÍNGUEZ PATIÑO
DR. RODRIGO MORALES CUETO
DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO
DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ FLORES
DR. FABÍAN JESÚS RENDÓN HERNÁNDEZ
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de **TESIS** titulado: **DESARROLLO DE UN SIMULADOR CON INTERFAZ GRÁFICA PARA EL GRUPO DE ESTUDIO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA H38D-EA**

Que presenta (el) o (la) **C. FABIOLA ZAVALETA DÍAZ**

Del programa educativo de: **LICENCIATURA en INGENIERÍA QUÍMICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T Á M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	DR. JORGE A. DOMÍNGUEZ PATIÑO	
	DR. RODRIGO MORALES CUETO	
	DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO	
	DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ FLORES	
	DR. FABÍAN JESÚS RENDÓN HERNÁNDEZ	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

VALH/fmg



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2023-04-17 16:20:21 | Firmante

Du1ZiNcpwHIU51w9U7JAYGXG2qxZIUJC7Ls1fGSg7VOu0xvEw2s1kGEJe53wifNXnPhQxcGS1Rpicxnp25QrCSqqUjJbtWhgg5JUOwDdvdouH47ZxxqF7cj6Ec6SBvVgDGZgmLjhh3fpCH8BzCWJ+IUzv9t6iX//dfiscGULRq2re7vqo4Y4yx2pYEGChoCTos98J8h5Xz+TK1Ec1ELnGG2hlnryv2qJdxbpqXhMtnJQUIUU+/A7F4IYKQ/6CsQjQ2gTmF3CUuLvt/jXsdqxQxxhymKOKwqREW44tF1EbjWiTwK3JrecJ0gOIU7EiS8hnn3D9TNwiRICKgQDw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



5fBYPWDvC

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/bINdbHBISrF3SD1EdBEoTmhcrsBPCDoo>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FABIAN JESUS RENDON HERNANDEZ | Fecha:2023-04-19 07:53:03 | Firmante

VGincQKLeElvu+S3asELDMHqzeukEGHTINAFTC9b7HylLRXmB6O9iePtQSPtQwJHQ7ScYsU4MHb37bOzMfgfunAavDbWiMBicuVzZE5aEBMrvOmgZmxCUqN4+NkSVwW96g1XaV7rRUDAvDpRuLO/dO4zTT+qEBSjTYBn67yuV/USEK3ugDFGbn4A3Nq7q+vn9RsTf1ol8oDRWZgIPr6ymz9Fty/DGG+BxslZG9aNLDAyWt98szdZTWO3iQJsADBvUy7kCSGSoOzPxxKr8Jsics5BalH4Dly1F3YXpjQrgMJoH0wUQ0yrG8l0MN18hRWw3maAO8hQCmtZ2dfWj4GSeQ==

RODRIGO MORALES CUETO | Fecha:2023-04-19 09:54:43 | Firmante

dB8/M+uJwsfsy1tF0XYbUINxFbbBlj0skv7qO3X5z8gPEHGhdCwo10bZaChid2M6gypGLI0RHITU++AERdsY8pnX0ACqFrlLaZuWnnA1k6T02m6L32MlwrvEvaXccJ4vgEPORA6+B/nkqxun9lq+NZOE0LkL0o3rkLmobD316dGvdg4Ad7o7Qbp+lko7RCeJDVAa3GOWHdovTLxvv9o9ylijjg5TpSyWuUZ9FusrilbxvuC4X+G7dIBH8xBMylTINa8475afLc9e6EBjZwb2I+uTvFCfK4CjHzohrUwzT0l/EDVuK3WEZOip6wnAftAmOwEGUk4mteiwZDxiMmWAmjQ==

MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO | Fecha:2023-04-19 10:17:21 | Firmante

cwwcd9KmV9Qoi1OOVGoIHL7Hkg3Zx828NHi/mcgqpt/Xd3Yhe4rD24mi8YPlmAA56j9/3ApYo1TcuY+K02NGKTR/e2DpBluzFr5HGRUHSmQvTTHruWWwODCw8kpEu3f+qJRHVifxUTpmu8dJ5nSQHcHU0tvXG4TUaqolKMuv9vaDjzxEDEHaXEJ+9THj4C+PoReGB05Om3PAg+VIWQ4L+AFYpSE1YE7RkU8X12CANMaliBj1TE0AFfSpHiuNVn7Ws6LWSjVizxhGe/5WongW3a4zVwGVOs0S2Gy9jhLct8Xigo8L8qE5hktYqb1Vi/CaW1MJ4YBVXpYZ6mp6fxqA==

VICTOR MANUEL VELAZQUEZ FLORES | Fecha:2023-04-26 09:26:01 | Firmante

NYr54OhVvj4o5bk29+YAAqsuvTfWu8NyK/ILoI9PIL8o188hsouznf2htcQ9p7pRiv1Lc69cDWI3Z9N4BCZi87UX0WBNyS9wW40UvIBiFOBMEu/IVVZIYyOmAHp4wtFQ0N5m1tSAIwRH5GFia4kpKfadmXC8JdJa1zt+u5LFheE01cPpXmLzX0+KTjFR+W7CVAY+nIqUCibEt4YRLaStdL49p2lYAhG6lRqatKndOBRHv0JdsE99FiMgnBu8YINjGng6wwUI6nw1DQWw1ZEdeLeBoZjQMBBnOZDunj3cQwAFoluSwoxmTZzctOMWiniVqxGHvdUthvNdx9WXw==

JORGE AVELINO DOMINGUEZ PATIÑO | Fecha:2023-04-26 10:00:06 | Firmante

DtfPPPXTvqZTogxdx0mkFhL9vcPjlrZzoTpVqkHkQOfA7R4KxSAWhKjtm5xm3vQCYLhsSmMx/7INhph5C5Oy5kiVckBKwPD86/qUB/RolyrL4K9qH4AWJaqtHlFMZycLghqHhrNU/UyyH8AGdyJWgXlm/h6Rn4hc8q5V98U1kZUbfmZFOI8C6YZ4ZayNhOf8OBy034wiF3WgOvJW47rJUgPK8+XNbZpw77SIZU3CGKln3CQUbMmmELOtpC220zOu3LyVkhjeKyY0c5Ss4ke1hDufoxJ1c1PbYxpHABRFEeWPK65bKflhYJGkdP214C+R7W5Q/sMTzIRBEg7g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



zfWlc6IKh

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/TcAvsPEgXvnyLhZUrWc0uOinlcCxkrb>

