



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DESARROLLAR UN MODELO CFD PARA EL ANÁLISIS
DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO EN TUBERÍAS
DEL BANCO DE PÉRDIDAS DE TURBOMAQUINARIA
HIDRÁULICA Y LABORATORIO”**

LLUGUAY DUCHI KLEVER ANGEL

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2016**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2015-03-17

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

LLUGUAY DUCHI KLEVER ANGEL

Titulada:

**“DESARROLLAR UN MODELO CFD PARA EL ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO EN TUBERÍAS DEL BANCO DE
PÉRDIDAS DE TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA Y LABORATORIO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Miguel Aquino Arroba
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Ordoñez Viñán
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: LLUGUAY DUCHI KLEVER ANGEL

TÍTULO DE LA TESIS: “DESARROLLAR UN MODELO CFD PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO EN TUBERÍAS DEL BANCO DE PÉRDIDAS DE TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA Y LABORATORIO”

Fecha de Examinación: 2016-01-18

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri Núñez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Miguel Aquino Arroba DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Marco Ordoñez Viñán ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Edwin Viteri Núñez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Klever Angel Lluquay Duchi

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Lluquay Duchi Klever Angel, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Lluquay Duchi Klever Angel
Cedula de Identidad: 060397445-2

DEDICATORIA

El presente trabajo dedico. A mis queridos padres Carlos y Carmen, A mis hermanos, Leónidas, Silvia, Fanny y Leydi. A mis tres pequeños sobrinos, Carlos, Dylan y Joseph.

Klever Angel Lluguay Duchi

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica por mi formación académica, a todos mis profesores por tener el valor de inculcarme sus conocimientos valiosos en mí.

A mis padres por el apoyo incondicional en mi formación profesional, a toda mi familia por haber estado conmigo en las situaciones malas y buenas de mi vida.

Klever Angel Lluquay Duchi

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Justificación.....	1
1.2.1	<i>Justificación técnica..</i>	1
1.2.2	<i>Justificación económica..</i>	1
1.3	Objetivos.....	1
1.3.1	<i>Objetivo general..</i>	1
1.3.2	<i>Objetivos específicos:</i>	2
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1	Introducción.....	3
2.2	Flujo en tuberías.....	3
2.2.1	<i>Numero de Reynolds..</i>	4
2.2.2	<i>La región de entrada..</i>	6
2.2.3	<i>Flujo laminar en tuberías..</i>	6
2.2.4	<i>Caída de presión y pérdida de carga..</i>	8
2.2.5	<i>Flujo turbulento en tuberías..</i>	9
2.2.6	<i>Perfiles de velocidad en un flujo a través de un tubo..</i>	10
2.2.7	<i>Perfil de velocidad turbulento..</i>	10
2.3	Ecuaciones Fundamentales para análisis de fluido incompresible.....	15
2.3.1	<i>Conservación de Masa..</i>	15
2.3.2	<i>Conservación de la cantidad de movimiento..</i>	16
2.4	Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional.....	16
2.4.1	<i>Ecuación de Continuidad..</i>	17
2.4.2	<i>Ecuación de Energía..</i>	18
2.4.3	<i>Modelos de turbulencia..</i>	18
2.5	Introducción a Técnicas Computacionales.....	19
2.5.1	<i>Discretización..</i>	19
2.5.1.1	<i>Método de diferencias finitas (FDM)..</i>	19
2.5.1.2	<i>Método de elementos finitos (FEM)..</i>	20
2.5.1.3	<i>Método de volúmenes finitos (FVM)..</i>	20
2.6	Tipos de mallados empleados en la CFD.....	20
2.6.1	<i>Mallas estructuradas..</i>	21
2.6.2	<i>Mallas no estructuradas..</i>	21
2.6.3	<i>Mallado híbrido..</i>	21
2.7	Software CFD.....	22
2.7.1	<i>ANSYS-CFX..</i>	22
3.	ANÁLISIS DEL CFD	
3.1	Análisis de la ecuación Navier-Stokes que gobierna el fluido incompresible.....	23
3.2	Introducción a la simulación CFD.....	24
3.3	Diagrama metodológico para la simulación en ANSYS-CFX.....	25
3.4	Pre-procesamiento.....	25
3.4.1	<i>Generación de la geometría..</i>	26
3.4.1.1	<i>Descripción de la geometría..</i>	26

3.4.1.2	<i>Modelado tridimensional de la geometría.</i>	26
3.4.2	<i>Mallado.</i>	27
3.4.2.1	<i>Selección del tipo de mallado.</i>	28
3.4.2.2	<i>Generación de la malla.</i>	30
3.4.2.3	<i>Calidad del mallado.</i>	33
3.4.2.4	<i>Análisis de la calidad del mallado.</i>	36
3.4.3	<i>Definición de propiedades y condiciones de frontera.</i>	41
3.4.3.1	<i>Entrada.</i>	42
3.4.3.2	<i>Salida.</i>	42
3.4.3.3	<i>Pared.</i>	43
3.5	<i>Procesamiento.</i>	43
3.5.1	<i>Resolución en estado estacionario (estable).</i>	43
3.5.1.1	<i>Propiedades del fluido.</i>	44
3.5.2	<i>Cálculo.</i>	44
3.5.3	<i>Intensidad de turbulencia.</i>	44
3.5.4	<i>Análisis de convergencia.</i>	46
3.6	<i>Post-procesamiento.</i>	47
3.6.1	<i>Análisis de resultados.</i>	48
3.6.1.1	<i>Perfil de velocidad en tubería de 1 plg.</i>	49
3.6.1.2	<i>Perfil de velocidad en tubería de ¾ plg.</i>	49
3.6.1.3	<i>Perfil de velocidad en tubería de ½ plg.</i>	50
4.	MEDICIONES EXPERIMENTALES	
4.1	<i>Evaluación actual del Banco de perdidas</i>	51
4.1.1	<i>Procedimiento para la calibración del sensor de presión tipo PX 302.</i>	52
4.1.1.1	<i>Características de los transductores de presión salida tipo cable (PX302).</i>	54
4.1.1.2	<i>Características del calibrador de manómetros.</i>	54
4.1.1.3	<i>Características de NI USB 6211.</i>	56
4.2	<i>Metodología de adquisición de datos</i>	57
4.2.1	<i>Descripción del banco de pérdidas.</i>	57
4.2.2	<i>Fundamentos de la adquisición de datos.</i>	58
4.2.2.1	<i>Procedimiento para la adquisición de datos en el banco de pérdidas.</i>	59
4.3	<i>Resultados de la generación de datos</i>	60
4.4	<i>Perfiles de velocidades</i>	60
4.4.1	<i>Perfil de velocidades para flujo laminar.</i>	60
4.5	<i>Perfil de velocidades para flujo turbulento</i>	61
4.5.1	<i>Cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ½ plg.</i>	62
4.5.2	<i>Cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ¾ plg.</i>	64
4.5.2.1	<i>Apertura de la válvula totalmente abierta.</i>	65
4.5.2.2	<i>Apertura de una vuelta en la válvula de compuerta.</i>	66
4.5.3	<i>Cálculo del perfil de velocidad en la tubería de 1 plg.</i>	67
4.5.3.1	<i>Apertura de la válvula totalmente abierta.</i>	67
4.5.3.2	<i>Apertura de la válvula con una vuelta.</i>	69
4.6	<i>Resultados.</i>	70
4.6.1	<i>Análisis del perfil de velocidad en tubería de 1 plg.</i>	70
4.6.2	<i>Análisis del perfil de velocidad en tubería de ¾ plg.</i>	72
4.6.3	<i>Análisis del perfil de velocidad en tubería de ½ plg.</i>	73
5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	
5.1	<i>Análisis de resultados CFD.</i>	74

5.2	Análisis experimental	75
5.3	Validación de resultados.....	75
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones.....	77
6.2	Recomendaciones	77

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Rango de valores del número de Reynolds 14
2	Modelos de turbulencia. 18
3	Características físicas y mecánicas del PVC 26
4	Valores de oblicuidad e indicadores de calidad..... 35
5	Parámetros de la condición de región tipo entrada. 42
6	Parámetros de la condición de región tipo salida. 43
7	Parámetros de la condición de región tipo pared..... 43
8	Valores de Intensidad de turbulencia..... 45
9	Características de las zonas de flujo turbulento..... 48
10	Mediciones de presión y Voltaje en el sensor para 30 psi..... 52
11	Datos del fluido para el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ½ plg 62
12	Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ½ plg en la 7 vuelta 63
13	Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ½ plg en 1 vuelta. .. 64
14	Datos del fluido para el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ¾ plg 65
15	Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ¾ plg en la 7 vuelta 65
16	Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ¾ plg en 1 vuelta. .. 66
17	Datos del fluido para el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de 1 plg. 67
18	Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de 1 plg en la 7 vuelta 68
19	Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de 1 plg en la 1 vuelta 69
20	Análisis de resultado del cálculo del flujo turbulento en el banco de tuberías. 70
21	Distribución de las velocidades en el interior de la tubería de 1 plg 71
22	Distribución de velocidades en el interior de la tubería de ¾ plg 72
23	Distribución de velocidades en el interior de la tubería de ½ plg 73
24	Resultados de las simulaciones en ANSYS CFX 74
25	Resultados experimentales 75
26	Análisis de resultados 76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Perfil de velocidad laminar..... 3
2	Perfil de velocidad en flujo laminar totalmente desarrollado..... 6
3	Tubería con superficies lisas o rugosas. 8
4	Perfil de velocidad turbulento..... 10
5	Perfil de velocidad turbulento universal..... 13
6	Perfil laminar y turbulento..... 14
7	Simulación de un fluido en ansys 24
8	Diagrama metodológico para ANSYS-CFX 25
9	Tubería de PVC de 1 plg 27
10	Tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ plg 27
11	Tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ plg 27
12	Mallado tetraédrico..... 28
13	Condiciones de barrido 28
14	Mallado hexa dominante 29
15	Mallado multizone..... 29
16	Dominio computacional 30
17	Selección de la entrada de la tubería para el mallado..... 31
18	Selección de la pared de la tubería para el mallado..... 31
19	Selección de la cara de salida de la tubería para el mallado..... 31
20	Geometría mallada en tubería de 1 plg..... 32
21	Detalle del mallado para tubería de 1 plg..... 32
22	Geometría mallada en tubería de $\frac{3}{4}$ plg..... 32
23	Detalle del mallado para tubería de $\frac{3}{4}$ plg..... 33
24	Geometría mallada en tubería de $\frac{1}{2}$ plg..... 33
25	Detalle del mallado para tubería de $\frac{1}{2}$ plg..... 33
26	Triángulos y cuadriláteros ideales y oblicuos..... 34
27	Detalle de la calidad de mallado en la tubería de 1 plg..... 36
28	Calidad de mallado vs número de elementos en el dominio 1 plg..... 36
29	Calidad de mallado vs porcentaje de elementos en el dominio de 1 plg..... 37
30	Elementos de oblicuidad en el dominio de 1 plg $< 0,21$ 37
31	Elementos de oblicuidad en el dominio de 1 plg $> 0,5$ 37
32	Detalle de la calidad de mallado en la tubería de $\frac{3}{4}$ plg..... 38
33	Calidad de mallado vs número de elementos en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg..... 38
34	Calidad de mallado vs porcentaje de elementos en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg..... 38
35	Elementos de oblicuidad en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg $< 0,21$ 39
36	Elementos de oblicuidad en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg $> 0,5$ 39
37	Detalle de la calidad de mallado en la tubería de $\frac{1}{2}$ plg..... 39
38	Calidad de mallado vs número de elementos en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg..... 40
39	Calidad de mallado vs porcentaje de elementos en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg..... 40

40	Elementos con oblicuidad en el dominio de $\frac{1}{2}$ plg $< 0,21$	41
41	Elementos con oblicuidad en el dominio de $\frac{1}{2}$ plg $> 0,5$	41
42	Asignación de nombres a caras de la geometría.....	42
43	Propiedades del agua para simulación estable.....	44
44	Configuración de la turbulencia a la entrada de las tuberías.	46
45	Análisis de la ecuación de continuidad y velocidad en la tubería de 1 plg	47
46	Análisis de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta.	47
47	Análisis de las zonas del perfil de velocidad turbulento.	48
48	Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 7 vuelta	49
49	Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 1 vuelta	49
50	Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 7 vuelta	49
51	Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 1 vuelta	50
52	Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 7 vuelta	50
53	Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 1 vuelta	50
54	Banco de pérdidas.....	51
55	Calibrador de manómetros.....	52
56	Grafica de valores del sensor PX 302-300GV.....	53
57	Transductor de presión PX302	54
58	Bomba neumática de mano Additel 914.....	55
59	Tarjeta de adquisición NI-USB 6211.	56
60	Banco de pérdidas automatizado	57
61	Interfaz del banco de pérdidas primarias	58
62	Panel frontal del banco de pérdidas primarias.....	58
63	Perfil de velocidad con $N_R = 73518$	63
64	Perfil de velocidad con $N_R = 66518$	64
65	Perfil de velocidad con $N_R = 56005$	66
66	Perfil de velocidad con $N_R = 53459$	67
67	Perfil de velocidad con $N_R = 44410$	68
68	Perfil de velocidad con $N_R = 41942$	69
69	Perfil de velocidad en la tubería de 1 plg	71
70	Perfil de velocidad en la tubería de $\frac{3}{4}$ plg	72
71	Perfil de velocidad en la tubería de $\frac{1}{2}$ plg	73

SIMBOLOGÍA

\dot{m}	Razón de flujo de masa
A_c	Área de la sección transversal
$\mu(r)$	Perfil de velocidad
V_{prom}	Velocidad de flujo promedio
ν	Viscosidad cinemática del fluido
U	Viscosidad dinámica o absoluta del fluido
ρ	Densidad del fluido
Re	Número de Reynolds
D	Diámetro interno de la tubería
F	Coefficiente de fricción del tramo
L	Longitud del tramo
\vec{V}	Velocidad del fluido
ν	Viscosidad cinética
U	Velocidad local en un radio
R	Radio
r_o	Radio máximo
ν	Velocidad promedio
U_{max}	Velocidad máxima
D_h	Diámetro hidráulico
ΔP	Caída de presión
g	Gravedad
τ_w	Esfuerzo de corte en la pared
y	Es la distancia desde la pared hasta el centro de la tubería
u^*	Velocidad de fricción
u_{max-u}	Defecto de velocidad

LISTA DE ABREVIACIONES

CFD	Computational Fluid Dynamics
PVC	Policloro de vinilo
RMS	Esfuerzos de Reynolds
DNS	Simulaciones numéricas directas
LES	Large Eddy Simulations
DES	Detached Eddy Simulations
FDM	Método de diferencias finitas
FEM	Método de elementos finitos
FVM	Método de volúmenes finitos
CAD	Dibujo aplicado por computadora
FSI	Interacción fluido estructura

LISTA DE ANEXOS

- A** Data Sheep Bomba Neumática ADT 914
- B** Transductores de presión
- C** Tablas de prueba de pérdidas primarias
- D** Productos y aplicaciones del manual técnico de tubosistemas de amanco
- E** Normas aplicables
- F** Velocidades maximas recomendadas para tuberías de PVC

RESUMEN

En esta tesis se desarrolló un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) para el análisis y simulación de los perfiles de velocidad en el banco de pérdidas del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica.

El perfil de velocidad es la simulación del comportamiento del fluido interno en el banco de tuberías de PVC. El modelo desarrollado para la simulación de los perfiles de velocidad se fundamenta en las ecuaciones de Navier-Stokes de flujo incompresible, tienen el principio de la conservación de masa y cantidad de movimiento.

En la solución de estas ecuaciones se utilizó ANSYS CFX basando en tres etapas para el computo numérico como son; Pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas mediante la simulación numérica por el método de los volúmenes finitos. La discretización del dominio se realizó con un mallado no estructurado por el método tetraédrico. En la etapa del procesamiento se soluciona en análisis estacionario el flujo de fluidos.

En la simulación se analiza el flujo de fluidos en los tres tramos de tuberías, difiere el diámetro, en las aperturas tomadas en el control del flujo de fluidos en las tuberías con los datos adquirido en el banco de pruebas.

La validación de resultados se realizó con el cálculo analítico del perfil de velocidades mediante los datos adquiridos en el banco de pruebas y con los resultados obtenidos en la simulación mediante ANSYS CFX, con un criterio del juicio de la ingeniería utilizando el mínimo porcentaje de error.

ABSTRACT

A Computational Fluid Dynamics model (CFD) was developed in this thesis for the analysis and simulation of the velocity profiles in the Bank losses of the hydraulic turbomachinery laboratory.

The velocity profile is the simulation of the internal fluid behavior in the bank of PVC pipes. The model developed for the simulation of the velocity profiles is based on the incompressible flow using the Navier-Stokes equations, they have the principle of conservation of mass and amount of movement.

ANSYS CFX program was used in the solution of these equations based in three stages for the numerical counting such as: Pre-processing, processing and post- processing. The Navier Stokes equations are solved by means of the numerical simulation by the finite volumes method. The discretization of the domain was carried out with a not structured meshing by the tetrahedral method. The fluid flow is solved in stationary analysis at the processing stage.

The fluids flow in the three sections of pipe is analyzed in the simulation, the diameter differs, in the openings taken in the flow fluids control in pipes with the acquired data in the test bank.

The validation of the results, was carried out with the analytical calculation of the velocity profile through the acquired data on the test bank and with the results obtained in the simulation by ANSYS CFX, with a criterion of the engineering judgment using the simulation.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El laboratorio de Turbo maquinaria Hidráulica que pertenece a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, posee bancos y equipos que brinda un importante aporte para la formación académica de los estudiantes de la Facultad de Mecánica.

El banco de pérdidas está constituido por una bomba, una red de tuberías y el sistema de automatización para la adquisición de datos. Para realizar la instalación del banco de pérdidas se realiza el cálculo de pérdidas primarias, secundarias y el estudio del análisis hidráulico.

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación técnica. En este proyecto de simulación el principal objetivo es el estudio y análisis del perfil de velocidades en función del diámetro de tuberías de PVC, orientando al análisis en sistemas de instalaciones Hidráulicas reales. La dinámica de fluidos computacional CFD (Computational Fluid Dynamics), es la técnica de solución numérica que gobierna las ecuaciones de Navier- Stokes en fluidos incompresibles.

1.2.2 Justificación económica. Observando la necesidad de simular en el banco de pruebas un modelo aplicando CFD (Computational Fluid Dynamics), para analizar el comportamiento del fluido en tuberías de PVC, para que esta investigación se un aporte a la Facultad de Mecánica por lo tanto a la ESPOCH.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. Desarrollar un modelo CFD para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de turbomaquinaria hidráulica y laboratorio.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

- Determinar el perfil de velocidades del fluido mediante el software ANSYS-CFX.
- Estudiar el fenómeno del flujo del fluido que atraviesa por las tuberías.
- Establecer una metodología CFD confiable y correcta para la simulación del comportamiento del fluido en tuberías de PVC.
- Realizar la evaluación al banco de pérdidas de Turbomaquinaria hidráulica y laboratorio.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

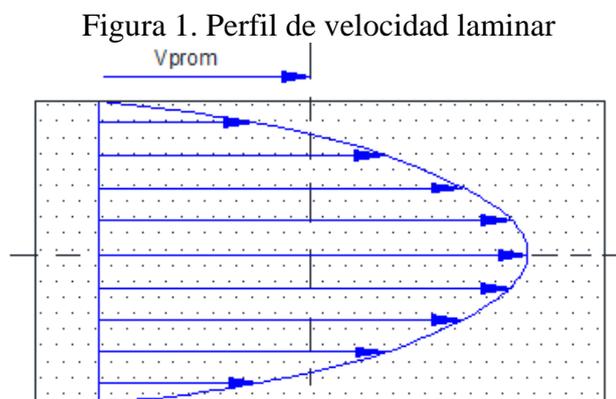
El flujo en tuberías, son los flujos que quedan completamente limitados por superficies solidas como se puede analizar en flujo interno de tuberías y en ductos comúnmente en sistemas de calefacción, enfriamiento y en redes de distribución de fluidos. En las tuberías, generalmente se tienen dos tipos de flujos laminar y turbulento, dependiendo de la velocidad del fluido y el diámetro de las tuberías por donde fluye. En la práctica, es más frecuente un flujo turbulento. (ROBERSON, 2002)

La naturaleza del flujo a través de un tubo está determinada por el valor que tome el número de Reynolds siendo este un número adimensional dependiente de la densidad, viscosidad, velocidad de flujo y el diámetro de la tubería.

En esta investigación el principal estudio es el análisis del comportamiento del fluido en el banco de tuberías. Para un respectivo análisis del comportamiento del flujo interno donde el conducto está totalmente lleno con el fluido y el flujo se impulsa principalmente mediante una bomba en un ciclo cerrado.

2.2 Flujo en tuberías.

En la práctica es común encontrar el flujo de fluidos en tuberías circulares y no circulares.



Fuente: (CIMBALA, 2006).

Considerando un flujo incompresible a través de un tubo de sección transversal circular, en el flujo de fluidos es conveniente trabajar con una velocidad promedio $P_{promedió}$ que permanece constante en flujo incompresible cuando el área de sección transversal de la tubería es constante como indica en la figura 1. (CIMBALA, 2006)

La velocidad promedio $P_{promedió}$ se determina en cierta sección transversal de flujo a partir del principio de conservación de masa.

$$\dot{m} = \rho V_{prom} A_c = \int_{A_c} \rho \mu[r] dA_c \quad (1)$$

Dónde:

\dot{m} = Razón de flujo de masa.

ρ = Densidad.

A_c = Área de la sección transversal.

$\mu [r]$ = Perfil de velocidad

La velocidad promedio para flujo incompresible en una tubería circular de radio R se puede expresar como:

$$V_{prom} = \frac{\int_{A_c} \rho \mu[r] dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho \mu[r] 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R \mu[r] r dr \quad (2)$$

2.2.1 *Numero de Reynolds.* Entre los factores importantes para la transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo y el tipo de fluido.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} D}{\nu} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} \quad (3)$$

Dónde:

V_{prom} = Velocidad de flujo promedio [m/s]

D = Longitud característica de la geometría [m]

$\nu = \mu/\rho$ = Viscosidad cinemática del fluido [m²/s]

El régimen de flujo depende principalmente de la razón entre las fuerzas inerciales y fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se llama número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería circular como se muestra en la ecuación (3).

Para flujos a través de tuberías no circulares, el número de Reynolds se basa en el diámetro hidráulico D_h que se define como.

Diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (4)$$

Donde:

A_c = área de sección transversal de la tubería [m²]

P = perímetro húmedo [m]

El diámetro hidráulico se define de modo que se reduce a diámetro común D para tuberías circulares.

Tuberías circulares:

$$D_h = \frac{4 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{\pi D} = D$$

Es optimo tener valores exactos de numero de Reynolds para flujo laminar, transitorio y turbulento, pero este no es el caso en la práctica.

Es evidente que la transición de flujo laminar a turbulento también depende del grado de perturbación del flujo por la rugosidad de la superficie, las vibraciones de la tubería y las fluctuaciones en el flujo. El número de Reynolds en las condiciones prácticas en tubería circular es: (CIMBALA, 2006)

$Re \leq 2300$ flujo laminar

$2300 \leq Re \leq 4000$ flujo transicional

$Re \geq 4000$ flujo turbulento

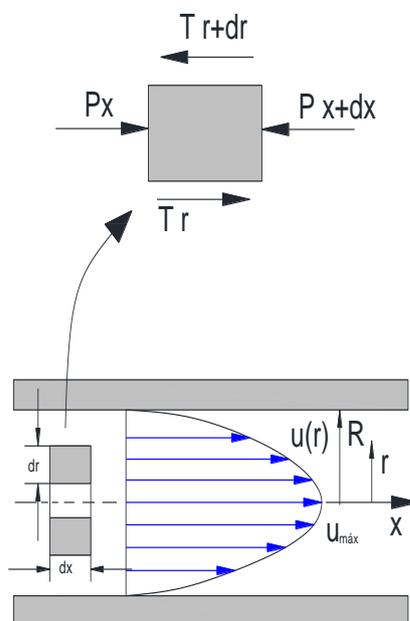
2.2.2 *La región de entrada.* La región desde la entrada a la tubería hasta el punto en el que la capa límite emerge en la línea central se llama región hidrodinámica, y la longitud de esta región se llama longitud hidrodinámica.

El flujo en la región de entrada se llama flujo en desarrollo hidrodinámico porque esta es la región donde se crea el perfil de velocidades, la zona más allá de la región de entrada en la que el perfil de velocidad está totalmente desarrollado y permanece invariable se llama región hidrodinamicamente desarrollada totalmente.

2.2.3 *Flujo laminar en tuberías.* Por su naturaleza se menciona que el flujo en tuberías es laminar para $Re \leq 2300$ y que el flujo está totalmente desarrollado si la tubería es suficientemente larga en relación con la longitud de entrada de modo que los efectos de entrada son despreciables.

El perfil de velocidad en flujo laminar totalmente desarrollado en una tubería es parabólico con un máximo en línea central y mínimo cero en la pared de la tubería como se indica en la figura 2.

Figura 2. Perfil de velocidad en flujo laminar totalmente desarrollado



Fuente: (CIMBALA, 2006)

$$u[r] = -\frac{R^2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (5)$$

La ecuación (5) gobierna el perfil de velocidad en flujo laminar, donde el gradiente de presión debe ser negativo (es decir la presión disminuye en la dirección del flujo).

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (2)

$$V_{prom} = \frac{2}{R^2} \int_0^R \mu(r) r dr = -\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{R^2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right] r dr \quad (6)$$

Resolviendo

$$V_{prom} = -\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{R^2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[r - \frac{r^3}{R^2} \right] dr$$

$$V_{prom} = -\frac{2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4R^2} \right]_0^R$$

$$V_{prom} = -\frac{2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[\frac{R^2}{2} - \frac{R^2}{4} \right]$$

$$V_{prom} = -\frac{2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[\frac{R^2}{4} \right]$$

$$V_{prom} = -\frac{R^2}{8\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \quad (7)$$

En un flujo completamente desarrollado el gradiente de presión es constante

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_2 - P_1}{L} = -\frac{\Delta P}{L} \quad (8)$$

$$V_{prom} = \frac{R^2 \Delta P}{8\mu L} \quad (9)$$

Cuando se relaciona las ecuación (5) con ecuación (7), esta es una forma conveniente para el perfil de velocidad.

$$\mu[r] = 2V_{prom} \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (10)$$

La velocidad máxima ocurre en la línea central y se determina a partir de la ecuación (10) cuando se sustituye $r = 0$

$$u_{max} = 2V_{prom} \quad (11)$$

2.2.4 Caída de presión y pérdida de carga. Es muy importante dentro del análisis de flujo en tuberías la caída de presión ΔP , porque está directamente relacionada con la potencia necesaria para que la bomba mantenga el flujo.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (12)$$

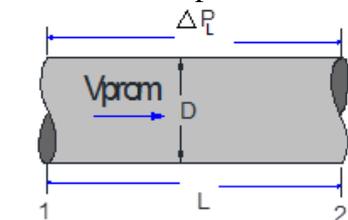
Cuando se sustituye la ecuación (12) en la expresión de V_{prom} de la ecuación (6), la caída de presión se puede expresar como:

Flujo laminar:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu LV_{prom}}{R^2} = \frac{32\mu LV_{prom}}{D^2} \quad (13)$$

El símbolo Δ se utiliza comúnmente para indicar la diferencia entre los valores final e inicial, como $\Delta y = y_2 - y_1$. Pero en flujo de fluidos, ΔP se usa para designar caída de presión, y por lo tanto es $P_1 - P_2$.

Figura 3. Tubería con superficies lisas o rugosas.



Fuente: (CIMBALA, 2006).

A partir de la ecuación (13) la caída de presión es proporcional a la viscosidad μ del fluido, y ΔP sería cero si no hubiera fricción.

En la práctica, es conveniente expresar la pérdida de presión para todos los tipos de flujo internos totalmente desarrollados (flujo laminar o turbulento, tuberías circulares o no circulares, superficies lisas o rugosas, tuberías horizontales o inclinadas) como.

Perdida de presión:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} \quad (14)$$

Perdida de carga:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (15)$$

El factor de fricción para flujo laminar totalmente desarrollado en una tubería circular:

Tubería circular, laminar:

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{prom}} = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

Tubería horizontal:

$$V_{prom} = \frac{[(P_1 - P_2)]R^2}{8\mu L} = \frac{[(P_1 - P_2)]D^2}{32\mu L} = \frac{\Delta P D^2}{32\mu L} \quad (17)$$

La velocidad promedio del flujo laminar en una tubería horizontal es, a partir de la ecuación (13).

Entonces, el flujo volumétrico de flujo laminar en una tubería horizontal de diámetro D y longitud L se convierte en:

$$\dot{V} = V_{prom} A_c = \frac{[P_1 - P_2]R^2}{8\mu L} \pi R^2 = \frac{[P_1 - P_2]\pi D^2}{128\mu L} = \frac{\nabla P \pi D^4}{128\mu L} \quad (18)$$

2.2.5 Flujo turbulento en tuberías. Es muy importante el estudio del flujo turbulento porque la mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica de ingeniería son de este tipo. En la tesis de grado se realizará el estudio de flujo en tuberías de PVC.

El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos, a través del flujo. En el flujo turbulento, los

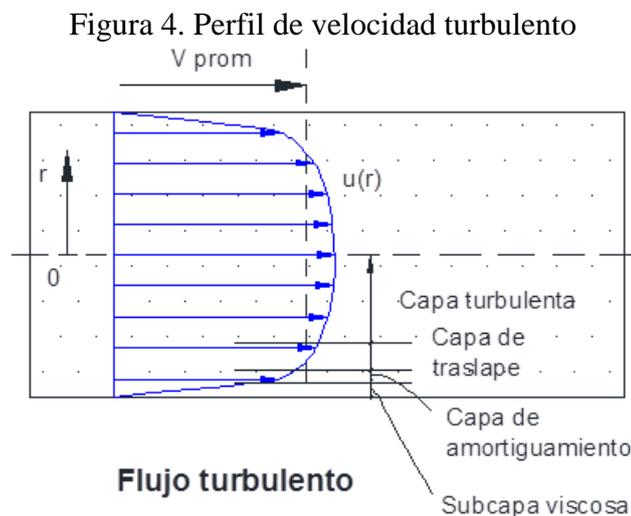
remolinos giratorios transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo con mayor rapidez que la difusión molecular. (CIMBALA, 2006)

2.2.6 *Perfiles de velocidad en un flujo a través de un tubo.* Para un flujo laminar completamente desarrollado, el perfil de la velocidad es parabólico se podría determinar por la siguiente ecuación:

$$\mu[r] = -\frac{R^2}{4\mu} \left[\frac{dp}{dx} \right] \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (23)$$

2.2.7 *Perfil de velocidad turbulento.* Para determinar el perfil de velocidad en un flujo turbulento se basan en el análisis y en las mediciones, por lo tanto son de naturaleza casi empírica, y tienen constantes que se determinan a partir de datos experimentales. En la figura 4, se indica el perfil de velocidad de flujo turbulento con sus respectivas capas en el interior del tubo. (CIMBALA, 2006)

El flujo turbulento a lo largo de una pared se puede considerar con cuatro regiones, que se caracterizan por la distancia desde la pared. La capa delgada junto a la pared llamada subcapa **viscosa** (o laminar o lineal o de pared).



El perfil de velocidad en esta capa es casi lineal, y el flujo es de líneas de corriente aproximadamente paralelas como en el flujo laminar. Junto a la subcapa viscosa esta la capa de amortiguamiento, en la que los efectos turbulentos se vuelven significativos, pero el flujo todavía es dominado por los efectos viscosos. Sobre la capa de amortiguamiento

esta la capa de traslape (o transición), también llamada subcapa inercial, en la que los efectos turbulentos son mucho más significativos, pero todavía sin dominar.

Sobre esta capa se encuentra la capa exterior o turbulenta en la parte restante del flujo en la que los efectos turbulentos dominan sobre los efectos de difusión molecular. (CIMBALA, 2006)

Las características del flujo son bastante distintas en diferentes regiones, por lo tanto es difícil llegar a una relación analítica para el perfil de velocidad para todo el flujo. La mejor solución en el caso turbulento se puede identificar las variables clave y las formas funcionales con el uso del análisis dimensional, y luego usar datos experimentales para determinar los valores numéricos de cualquier constante. Existen varios métodos empíricos para determinar el perfil de velocidades en una tubería a continuación se describen dos métodos.

En la subcapa viscosa se esperaría que el perfil de velocidad sea casi lineal, y los experimentos confirman esto. Entonces el gradiente de velocidad en la subcapa viscosa permanece constante, y el esfuerzo de corte en la pared se puede expresar como:

$$\tau_w = \mu \frac{u}{y} = \rho \nu \frac{u}{y} \quad \text{o} \quad \frac{\tau_w}{\rho} = \frac{\nu u}{y} \quad (24)$$

Dónde:

y = Es la distancia desde la pared hasta el centro de la tubería (note que $y = R - r$ para una tubería circular).

τ_w/ρ = Con frecuencia se encuentra en el análisis de perfiles de velocidad turbulentos.

$u_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$: Velocidad de fricción.

A continuación se describe la ecuación matemática de la subcapa viscosa.

Subcapa viscosa:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{y u_*}{\nu} \quad (25)$$

Esta ecuación se conoce como la ley de la pared y se correlaciona satisfactoriamente con los datos experimentales para superficies lisas para $0 \leq yu_*/\nu \leq 5$.

Espesor de la subcapa viscosa:

$$y = \delta_{subcapa} = \frac{5\nu}{u_*} = \frac{25\nu}{u_\delta} \quad (26)$$

Donde u_* es la velocidad del flujo en el borde de la subcapa viscosa, que está estrechamente relacionada con la velocidad promedio de una tubería. Así se llega a la conclusión que el espesor de la subcapa viscosa es proporcional a la viscosidad cinemática

La cantidad ν/u_* tiene dimensiones de longitud y se llama longitud viscosa; se usa para eliminar la dimensión de distancia y desde la superficie.

Variables dimensionales:

$$y^+ = \frac{yu_*}{\nu} \quad \text{y} \quad u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (27)$$

Ley de la pared normalizada:

$$u^+ = y^+ \quad (28)$$

El análisis dimensional indica, y los experimentos confirman, que la velocidad en la capa de traslape es proporcional al logaritmo de la distancia y el perfil de velocidad se puede expresar como:

Ley logarítmica:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{yu_*}{\nu} + B \quad (29)$$

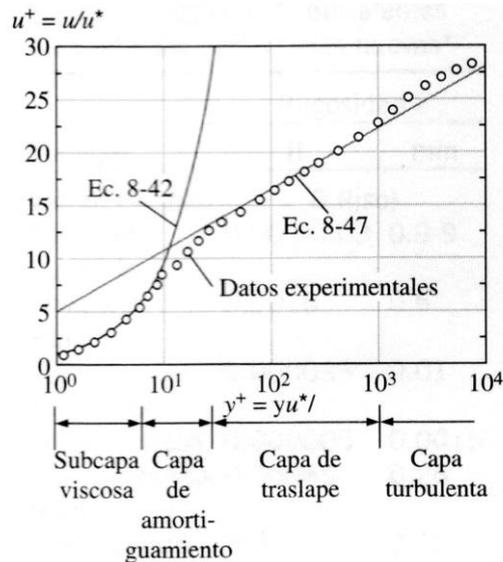
Donde k y B son constantes cuyos valores determinados experimentalmente son aproximadamente 0,40 y 5,0; respectivamente. Sustituyendo en la ecuación (29) que se conoce como Ley logarítmica, los valores de las constantes, el perfil de velocidad turbulento en diferentes capas se determina como:

Capa de traslape:

$$\frac{u}{u_*} = 2,5 \ln \frac{yu_*}{\nu} + 5,0 \quad \text{o} \quad u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,0 \quad (30)$$

Es evidente que la ley logarítmica en la ecuación (30) representa satisfactoriamente los datos experimentales para toda la región del fluido excepto para las regiones cercanas a la pared y próximas al centro de la tubería, como se indica en la figura 5 y por tanto se considera como un perfil de velocidad universal para flujo turbulento en tuberías o sobre superficies.

Figura 5. Perfil de velocidad turbulento universal



Fuente: (CIMBALA, 2006)

Capa turbulenta exterior:

$$\frac{u_{max-u}}{u_*} = 2.5 \ln \frac{R}{R-r} \quad (31)$$

Dónde:

u_{max-u} = Se llama defecto de velocidad.

Esta relación muestra que el perfil de velocidad se caracteriza por ser normalizado en la región central del flujo turbulento en una tubería depende de la distancia desde la línea central y se considera independiente de la viscosidad del fluido.

Primer Método. Otra forma de definir el perfil de velocidad en una tubería en régimen turbulento es con el perfil de ley de potencia, que es un método relativamente más simple y mejor conocido que se expresa como: (ROBERSON, 2002)

Perfil de velocidad de ley de potencia:

$$\frac{u}{u_{max}} = \left[\frac{y}{R}\right]^{1/n} \quad \text{o} \quad \frac{u}{u_{max}} = \left[1 - \frac{r}{R}\right]^{1/n} \quad (32)$$

Donde y se mide desde la pared hasta el centro de la tubería y n es un entero entre 5 y 10 que depende del número de Reynolds y se puede relacionar con el factor de fricción como:

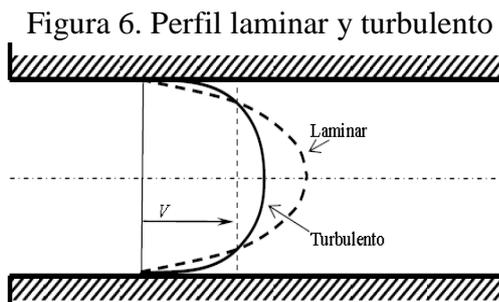
$$n = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (33)$$

Para el caso de tuberías lisas el exponente n se puede determinar en función del número de Reynolds en la tabla 1. (ROBERSON, 2002)

Tabla 1. Rango de valores del número de Reynolds

Re	4×10^3	10^5	10^6	$> 2 \times 10^6$
n	6	7	9	10

Fuente: (ROBERSON, 2002)



Fuente: Autor

En la gráfica se observa la diferencia entre un flujo laminar y turbulento dentro de una tubería estándar, así como su comportamiento dentro de la misma.

Es muy importante saber que el perfil de ley de potencia no se puede usar para calcular esfuerzo de corte de pared, porque ahí proporciona un gradiente de velocidad infinito, y fracasa para dar pendiente cero en la línea central.

Pero, estas regiones de discrepancia constituyen una pequeña porción de flujo, y el perfil de ley de potencia, excepto estas regiones, proporciona resultados muy precisos para flujo turbulento en una tubería. En la figura 6 se indica el perfil de velocidad obtenido con este método comparado con un perfil laminar.

2.3 Ecuaciones Fundamentales para análisis de fluido incompresible

Las ecuaciones de conservación que gobiernan el fluido incompresible son las siguientes:

- Conservación de Masa
- Conservación de cantidad de movimiento

2.3.1 Conservación de Masa. El principio de la conservación de la masa es uno de los principios más fundamentales de la naturaleza. En el transcurso de un proceso de flujo estacionario, la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control no cambia con el tiempo (la masa en el volumen de control es constante). Entonces el principio de conservación de la masa exige que la cantidad total de que entra en un volumen de control sea igual a la cantidad de masa que sale de él. (CIMBALA, 2006)

La ecuación de conservación de masa para flujo estacionario de un fluido viscoso, newtoniano e incompresible, las ecuaciones de movimiento son las ecuaciones de continuidad.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (34)$$

La ecuación de Navier-Stokes es una ecuación de transporte que representa la cantidad de movimiento lineal en el dominio computacional. A continuación se representa e identifica cada elemento de la ecuación.

$$[\vec{\nabla} \cdot \vec{V}] \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (35)$$

Donde:

\vec{V} = Es la velocidad del fluido

ρ = Es la densidad del fluido

$\nu = \mu/\rho$ = Es la viscosidad cinética

2.3.2 Conservación de la cantidad de movimiento. La ecuación de cantidad de movimiento tiene el principio de la segunda ley de Newton la cual constituye la variación del momento resultando la sumatorio de todas las fuerzas que actúan sobre un elemento.

Continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (36)$$

Las ecuaciones de cantidad de movimiento en X, Y, Z, pueden resolverse mediante la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) para el caso de flujo estacionario, incompresible, de un fluido newtoniano. (CIMBALA, 2006)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{P'}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (37)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{P'}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (38)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{P'}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (39)$$

2.4 Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional.

La dinámica de Fluidos Computacionales está basado en tres principios fundamentales que son las ecuaciones que gobiernan el fluido incompresible que se describe a continuación:

- La conservación de la masa.
- La conservación de la cantidad de movimiento.
- La conservación de la energía.

Para nuestro caso de estudio no interviene el tercer principio, debido que estamos analizando un fluido incompresible estacionario.

2.4.1 Ecuación de Continuidad. El principio físico que se define en la ecuación de la continuidad es la conservación de la masa. Este principio básico se define como el flujo neto de la masa con relación al volumen de control.

Este principio básicamente se define que el flujo neto de masa saliendo del volumen de control a través de la superficie de control es igual a la razón de disminución de masa dentro del volumen de control. Considerando el modelo de flujo de un volumen de control finito y fijo en el espacio se deriva la siguiente ecuación integral, que es de forma “conservativa”. (JOHN D. ANDERSON JR, 1995)

$$\int_S \rho d\vec{V} \cdot \vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = 0 \quad (40)$$

Para un modelo de flujo que considera un elemento infinitesimal pequeño fijo en el espacio se deriva un tipo de ecuación diferencial de forma conservativa. Esta expresión es usada en la programación computacional, es la siguiente. (JOHN D. ANDERSON JR, 1995). Donde u , v y w son aquellas componentes que representan la velocidad en la dirección x , y y z respectivamente.

Es el esfuerzo cortante que genera el cambio de volumen en la dirección “ x ” del elemento; $\partial\tau_{xx}$ y $\partial\tau_{zx}$ son los esfuerzos cortantes que generan una deformación tangencial sobre el elemento, y f_x representa la fuerza en la dirección “ x ”.

Las ecuaciones antes mencionadas también pueden ser expresadas de forma conservativa si analizamos el mismo elemento infinitesimal de fluido, pero fijo y no en movimiento. Las siguientes ecuaciones de “NAVIER-STOKES” se representan en forma conservativa. (JOHN D. ANDERSON JR, 1995)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla}[\rho u \vec{V}] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + \rho \cdot f_x \quad (44)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla}[\rho v \vec{V}] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + \rho \cdot f_y \quad (45)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla}[\rho w \vec{V}] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} + \rho \cdot f_z \quad (46)$$

2.4.2 Ecuación de Energía. El principio físico de la ecuación de energía se basa en la conservación de energía y aplicando este principio para un elemento infinitesimal que establece sus bases en la primera ley de la termodinámica que señala la razón de cambio de energía dentro del elemento de fluido es igual al flujo neto de calor entrando al elemento.

2.4.3 Modelos de turbulencia. Dentro del campo de la simulación de los problemas de ingeniería aplicado CFD, se debe aplicar un modelo matemático equivalente a un problema real considerando todas las variables para dicha solución adecuada.

Además de las ecuaciones gobernantes se debe tener en cuenta que el fenómeno es la turbulencia casi siempre está presente en el flujo de fluidos a nivel práctico.

Tabla 2. Modelos de turbulencia.

Tipos de modelo	Modelo
Algebraicos	Cebeci-Smith Baldwin-Lomax
Modelos de una ecuación	Prandtl Spalart-Almaras
Modelo de dos ecuaciones	K-Epsilon K-w
Esfuerzos de Reynolds	RMS
Simulaciones numéricas directas	DNS
Large Eddy Simulations	LES
Detached Eddy Simulations	DES

Fuente: (PODGORNIK, 2007)

Hasta la actualidad los investigadores no han definido un modelo de turbulencia aceptado. El flujo turbulento tiene pequeñas variaciones en sus propiedades a una frecuencia alta respecto al valor promedio.

Un modelo de turbulencia a partir de principios básicos no ha podido ser solucionada para aplicaciones de ingeniería por eso existen modelos semi-empírico y estadístico.

Como se puede observar en la Tabla 2 existen varios modelos de turbulencia pero ningún modelo es aceptado universalmente como el mejor en las respectivas aplicaciones, sino que cada modelo son más eficiente o menos eficiente en cuanto a precisión o costo computacional en el análisis de simulación de flujo turbulento.

2.5 Introducción a Técnicas Computacionales.

En esta etapa se hace una introducción detallada de las técnicas computacionales básicas, es decir que existen métodos para convertir las ecuaciones diferenciales sean de primero o segundo orden a expresiones discretas aproximadas, las cuales se utilizan para resolver esquemas numéricos de solución y las principales técnicas de discretización utilizadas son las siguientes.

2.5.1 Discretización. La aproximación de una variable continua en un número finito de puntos se llama *discretización*. Donde se tiene un dominio de algún estado de flujo de un fluido y se quiere encontrar una solución mediante técnicas de CFD, en realidad no encuentra la solución del dicho dominio por completo, sino que resuelve las ecuaciones para ciertos puntos discretos.

Por lo general existen varias formas o técnicas para hallar soluciones discretas a partir de las ecuaciones diferenciales parciales como en todo tienen sus ventajas y desventajas. Las principales técnicas de discretización son las siguientes:

- Método de diferencias finitas (FDM).
- Métodos de elementos finitos (FEM).
- Método de volúmenes finitos (FVM).

2.5.1.1 Método de diferencias finitas (FDM). Es el método más simple de discretización, el dominio se divide en una serie de puntos conocidos como puntos de mallas o red de nodos.

Los resultados se obtienen para cada uno de ellos permite a las ecuaciones diferenciales que se aproximen a través de las series de Taylor truncadas utilizando las llamadas diferencias finitas, aplicando las ecuaciones algebraicas aproximadas a cada punto se obtiene como resultado un sistema de ecuaciones que resuelto nos da resultados para cada punto de malla.

La ventaja de este método es que la discretización es relativamente fácil de programar, este método solo trabaja bien con geometrías regulares y es deficiente para trabajar con geometrías complejas aplicando el método de diferencias finitas.

2.5.1.2 Método de elementos finitos (FEM). Es un método muy avanzado para soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, basado en el método de los residuos ponderados, además es un método muy poderoso para soluciones de ecuaciones parciales.

En este método el dominio es dividido en una serie de elementos y se obtienen resultados para las esquinas de cada elemento, aplicando una función de interpolación para hallar valores de las propiedades dentro de cada elemento. El procedimiento que se sigue para obtener ecuaciones para cada elemento en el método de FEM consiste en utilizar el método de Galerkin o de los residuos ponderados y polinomios de interpolación.

La ventaja de este método en las ecuaciones diferenciales parciales lineales permite la solución exacta en los nodos, es un método apropiado para geometrías complejas y muy usadas en mecánica de sólidos, este método no se utiliza para flujo de fluidos y transferencia de calor por ser menos eficiente que el método de volúmenes finitos.

2.5.1.3 Método de volúmenes finitos (FVM). Este método realiza una división del espacio físico en volúmenes de control y la solución se obtiene para el centro de cada volumen. En este método se usan las ecuaciones diferenciales parciales en su forma integral y estas son aproximaciones mediante funciones de interpolación en ecuaciones algebraicas.

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía, este método de volumen finito tiene la ventaja de tener alta eficiencia computacional cuando es usado en problemas de flujo o transferencia de calor, este método no se puede aplicar en problemas de mecánica de sólidos.

2.6 Tipos de mallados empleados en la CFD.

El objetivo de un código de CFD es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo con unas características determinadas y para una geometría concreta.

El código de CFD resuelve dichas ecuaciones en una serie de puntos de la geometría en cuestión mediante métodos numéricos que transforman las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, proceso que se denomina discretización espacial a emplear

depende del tipo de discretización, el primer paso que se da en resolver las ecuaciones es la selección de los puntos en los que se llevara a cabo la discretización, proceso que se denomina generación del mallado.

Seleccionados los puntos, se unen mediante líneas dando lugar a lo que se denominan celdas que pueden tener forma de triángulos y cuadriláteros en el caso de dominios bidimensionales y de tetraedros, hexaedros, prismas y pirámides en el caso de dominios tridimensionales. Caracterizando al mallado por su conectividad de sus puntos existen tres tipos de malla:

- Malla estructurada.
- Malla no estructurada.
- Malla híbrida.

2.6.1 *Mallas estructuradas.* La principal utilidad de la malla estructurada está en el ordenamiento de los elementos en memoria, ya que de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil sin más que sumar y restar un número al valor del índice correspondiente.

2.6.2 *Mallas no estructuradas.* Los mallados no estructurados presentan una gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas.

Una de la principal ventaja de los mallados no estructurados reside en que los triángulos (2-D) o los tetraedros (3-D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica es importante determinar unos parámetros adecuadamente para conseguir una buena calidad de malla. El tiempo requerido por una computadora para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que se requiere para uno estructurado.

2.6.3 *Mallado híbrido.* El mallado híbrido es una combinación de mallas estructuradas y no estructuradas.

En algunos casos, como por ejemplo para la modelación de flujo viscoso se necesita de un refinamiento de malla para la capa límite, la cual puede ser malla estructurada y para el resto del dominio una malla no estructurada.

2.7 Software CFD

En la actualidad las empresas, universidades e institutos de validación, aplican el software para el análisis mediante la Dinámica de fluidos computacional (CFD) software de simulación de ANSYS Fluid Dynamics Solutions ANSYS le permite predecir, con confianza, el impacto de los flujos de fluidos en su producto a través del diseño y la fabricación, así como durante el uso final.

2.7.1 ANSYS-CFX. El Software ANSYS CFX es de alto rendimiento, el propósito general del programa de dinámica de fluidos que se ha aplicado para resolver amplios problemas de flujo de fluidos por más de 20 años.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DEL CFD

El objetivo de esta tesis de grado es desarrollar un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas del laboratorio Turbomaquinaria Hidráulica. En este capítulo se presenta el procedimiento llevado a cabo para simular este fenómeno por medio del programa ANSYS-CFX, paquete de CFD basado en el método volúmenes finitos.

En esta sección se presenta algunas consideraciones importantes que deben tenerse en cuenta al usar las técnicas para la simulación del flujo de fluidos.

3.1 Análisis de la ecuación Navier-Stokes que gobierna el fluido incompresible

Las ecuaciones de Navier-Stokes simulan el comportamiento de un fluido incompresible basándose en dos principios importantes en la conservación de la masa y la cantidad de movimiento.

Por lo tanto se realiza la solución numérica de estas ecuaciones como en el caso del dominio computacional, las ecuaciones gobernantes también necesitan ser discretizadas por el método de volúmenes finitos mediante la Dinámica de Fluidos Computacionales utilizando un software de simulación ANSYS-CFX. El objetivo principal de esta tesis de grado es el análisis de los perfiles de velocidad en el banco de tuberías por eso la ecuación de conservación de la masa y cantidad de movimiento desarrolla el modelo matemático para la simulación del flujo incompresible estacionario.

Cuando se usa un modelo de turbulencia se debe analizar el modelo matemático y el fenómeno físico. La ecuación de Navier-Stokes ecuación (35) se reemplaza por lo que se llama ecuación de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (NSRP, RANS por sus siglas en inglés), que se muestra aquí para flujo turbulento, incompresible, estacionario.

$$[\vec{\nabla} \cdot \vec{V}] \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot [\tau_{ij, \text{ turbulento}}] \quad (47)$$

Comparando con la ecuación (35), hay un término adicional en el lado derecho de la ecuación (47) que justifica las fluctuaciones turbulentas. $\tau_{ij, turbulento}$ es un tensor conocido como tensor de esfuerzo específico de Reynolds.

Es importante mencionar la complejidad de desarrollar el modelo. Las ecuaciones de Navier- Stokes solucionan mediante la etapa del procesamiento en ANSYS-CFX.

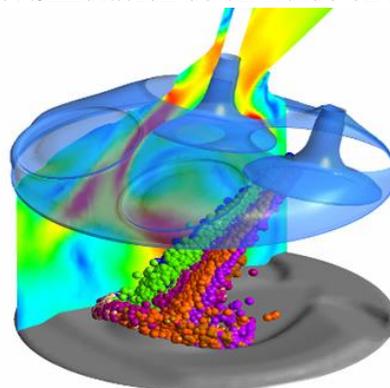
3.2 Introducción a la simulación CFD

Antes de comenzar con la simulación CFD se debe establecer qué tipo de problema se está analizando y además el método de solución a emplear.

En el capítulo 2 se describe el fenómeno de flujo en tuberías. Se simula en el banco de pérdidas del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica para la demostración del cálculo de pérdidas. Este banco consiste con tres tuberías de 1 m de longitud cada una con un diámetro 1plg, $\frac{3}{4}$ plg y $\frac{1}{2}$ plg, respectivamente por donde fluye agua para la simulación en régimen estable con un determinado caudal en cada tubería. Considerando lo descrito anteriormente se debe analizar una simulación estable que logre representar el fenómeno que ocurre para el respectivo análisis de los perfiles de velocidad en las tuberías, para proceder a compararla con los resultados analíticos.

La simulación estacionaria CFD (Computational Fluid Dynamics), gobierna la ecuación de Navier-Stokes de fluidos incompresibles, se resuelve numéricamente por el método de volúmenes finitos aplicando el software ANSYS-CFX. En el diagrama del desarrollo metodológico para la simulación se dará una mayor descripción.

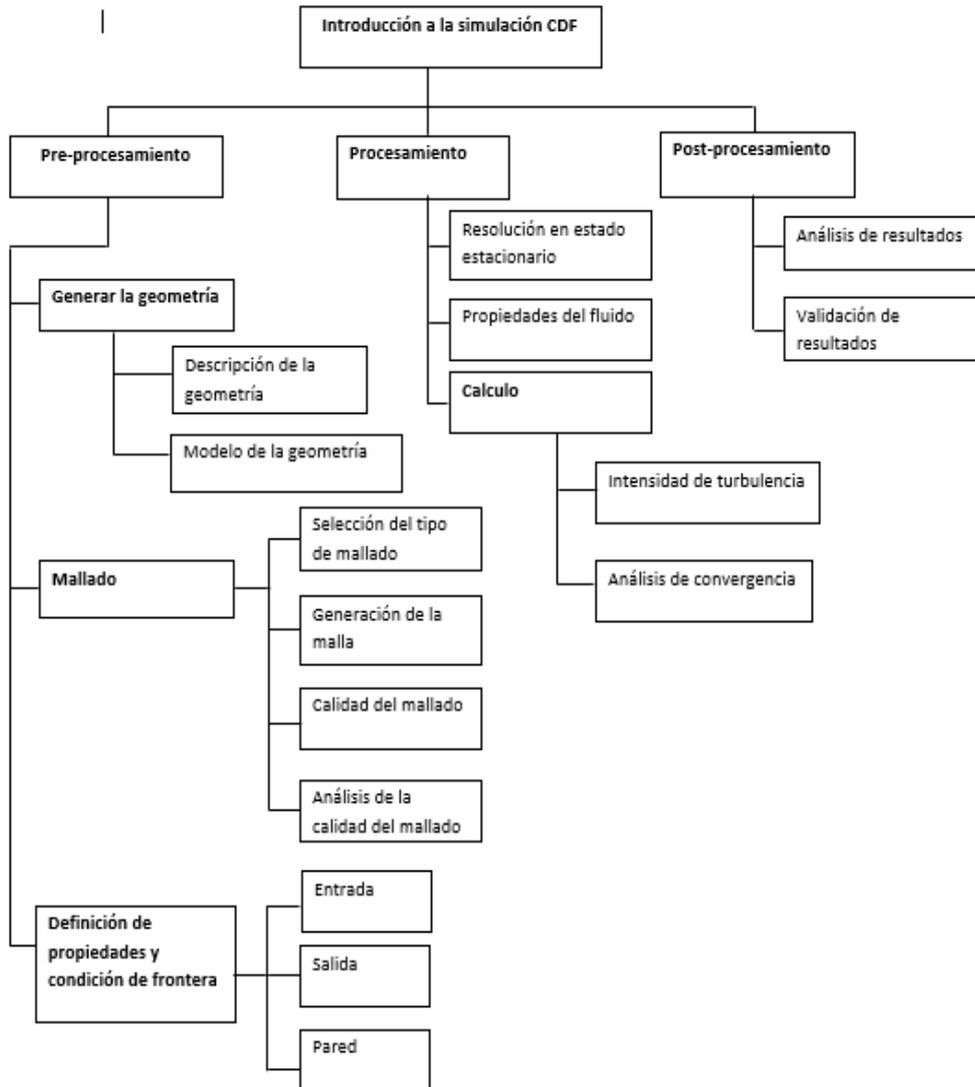
Figura 7. Simulación de un fluido en ANSYS



Fuente: (ANSYS.INC, 2015)

3.3 Diagrama para el desarrollo metodológico para la simulación en ANSYS-CFX.

Figura 8. Diagrama metodológico para ANSYS-CFX



Fuente: Autor

3.4 Pre-procesamiento

La etapa de pre-procesamiento es la que define las características generales del problema de simulación y requiere un entendimiento y control adecuado del fenómeno de tal modo que se garantice resultados verídicos. En esta etapa del desarrollo del problema es preciso atravesar tres pasos fundamentales que satisfacen la etapa de solución.

- Creación de un modelo CAD del dominio computacional que represente de manera física la situación experimental.

- Generación de la malla que se ajusta al modelo CAD según sea el caso estudiado se definen los tipos de mallado que conforman la geometría.
- Definición física del modelo, que componen la simulación, las condiciones de frontera y los parámetros de solución.

3.4.1 *Generación de la geometría.* Como el problema es de flujo confinado en un ciclo cerrado, el primer paso consiste en representar la geometría tridimensional que ocupa el agua dentro de la tubería. Para efectos de la simulación se consideran las tuberías rígidas. La circulación del fluido en las tuberías es impulsada mediante una bomba.

3.4.1.1 *Descripción de la geometría.* La geometría del banco de pérdidas del cual se va realizar la simulación es muy sencilla, sin ningún tipo de forma complicada para modelar.

Donde el banco está constituido con los diferentes accesorios como codos, té, válvulas, uniones, instrumentos y las tres tuberías de longitud de un metro con diámetros diferentes, donde se va realizar el análisis de la simulación del comportamiento del fluido, las respectivas propiedades del material de las tuberías se detallan a continuación en la tabla 3 y también se indica el modelado geométrico en la figura 9, 10 y 11.

Tabla 3. Características físicas y mecánicas del PVC

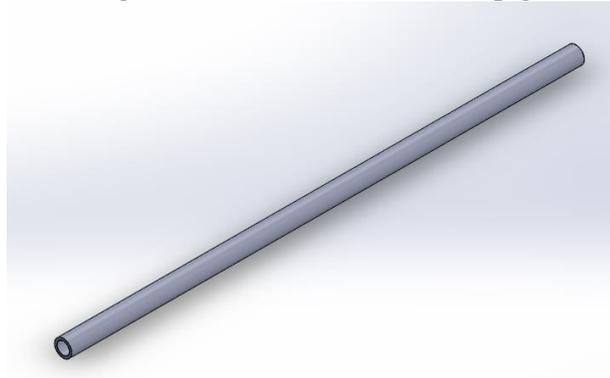
Característica	Valor	Unidad
Densidad	1,400	g/cm ³
Esfuerzo tangencial de trabajo a 20°	10,000	MPa
Coefficiente de dilatación térmica	0,008	°C ⁻¹
Conductividad térmica	0,130	kcal/ml°C
Módulo de elasticidad	3000	MPa
Tensión admisible	490-600	kg/cm ²
Resistencia a compresión	760	kg/cm ²
Resistencia a la flexión	1097	kg/cm ²

Fuente: (Arviza, Balbastre, & Cano, 2002)

3.4.1.2 *Modelado tridimensional de la geometría.* Para la construcción de la geometría 3D del modelo se podría emplear cualquier programa de CAD que permita modelar sólidos y posteriormente exportar este archivo al ANSYS-CFX en un formato adecuado.

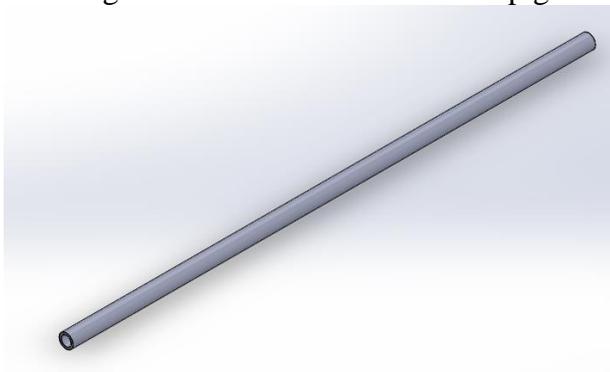
Para representar el modelo 3D se empleó SOLIDWORK, en la simulación.

Figura 9. Tubería de PVC de 1 plg



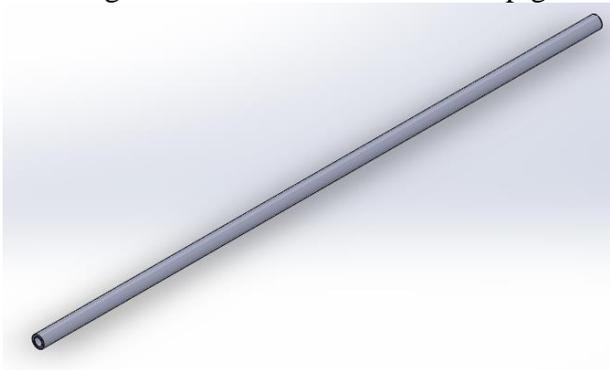
Fuente: Autor

Figura 10. Tubería de PVC de ¾ plg



Fuente: Autor

Figura 11. Tubería de PVC de ½ plg



Fuente: Autor

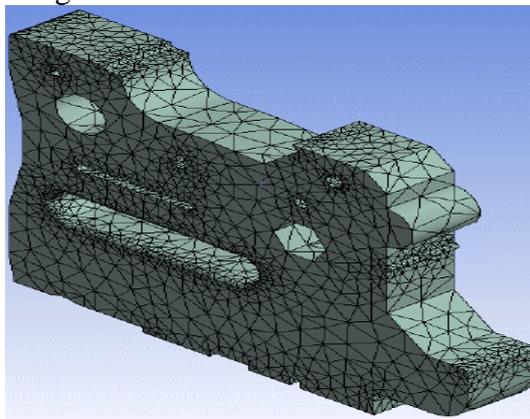
3.4.2 *Mallado.* El mallado de la geometría se realiza para dividir el dominio completo en varios volúmenes de control y así la solución se obtiene para cada uno de estos volúmenes.

El paquete ANSYS-CFX posee su propio generador de malla, el cual se empleó para obtener el mallado del modelo, con sus respectivas características.

3.4.2.1 Selección del tipo de mallado. Para proceder a construir el mallado de una geometría, el primer paso es seleccionar el tipo o procedimiento de mallado. En el ANSYS-CFX el generador de mallas tiene varios métodos disponibles para mallado de volúmenes que son los siguientes;

- Tetrahedros. Genera mallas tetraedrales, en él se incluye un factor de expansión que controla la tasa de crecimiento del tamaño de los volúmenes de control, convirtiéndolo en el único método que no deforma el dominio.

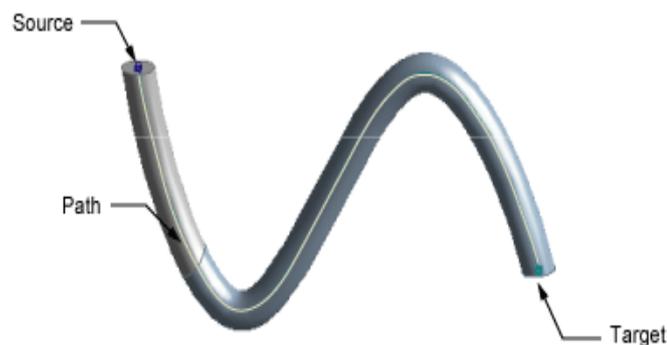
Figura 12. Mallado tetraédrico



Fuente: ANSYS-CFX

- Sweep. Para utilizar este método se requieren geometrías que posean dos caras continuas y que no sea hueco, ya que el inicia el barrido en una cara (source) discretizandola en hexaedros y copiando en pequeñas secciones o capas hasta llegar a la cara objetivo (target). Este método se diferencia de los demás por ser uno de los que menos elementos y nodos utiliza, requiriendo menor tiempo de cómputo.

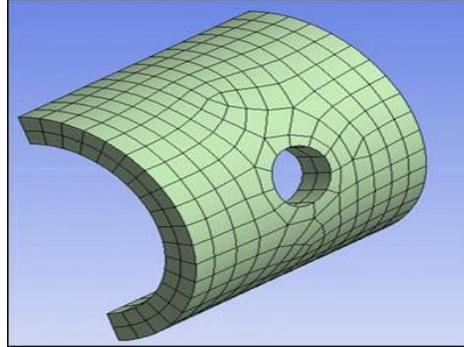
Figura 13. Condiciones de barrido



Fuente: ANSYS-CFX

- Hexa dominant. Este método se utiliza cuando un sólido no puede ser barrido. El nombre de hexaedro dominante no significa que los únicos elementos utilizados sean hexaedros, puesto que, en el mallado también se puede apreciar tetraedros.

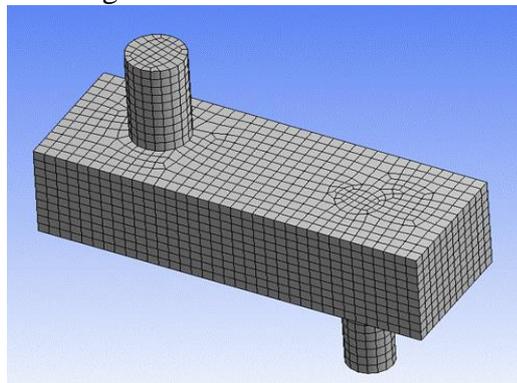
Figura 14. Mallado hexa dominante



Fuente: ANSYS-CFX

- CFX Mesh. Genera mallas de alta calidad para simulación de Dinámica Computacional de Fluidos, produce prisma, tetraedros y pirámides en el mallado 3D, y hexaedros para mallas 2D. A diferencia de los demás métodos CFX mesh incluye opciones avanzadas de control en la generación de mallas de superficie y volumen.
- Multizone. Es la técnica de la red independiente que proporciona descomposición automática de la geometría trazada de las regiones y las regiones libres.

Figura 15. Mallado multizone



Fuente: ANSYS-CFX

- Automatic: Combina los elementos de tetraedros y hexaedros para barrer el sólido que se malla dentro del software correspondiente.

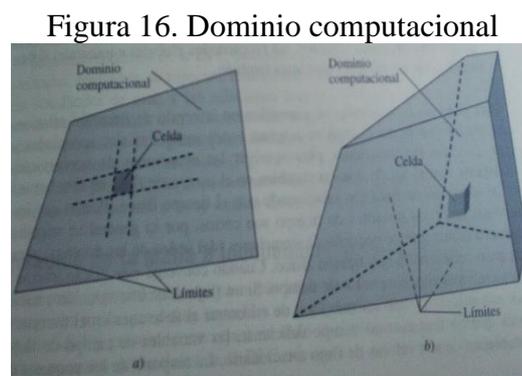
Los métodos disponibles en ANSYS-CFX tienen ciertas ventajas sobre otro al emplearse en ciertos casos específicos. Por eso se debe seleccionar el método adecuado para realizar el mallado de las tuberías, donde se debe tener en cuenta la geometría para seleccionar el método que menos deforme el dominio y aquel que represente de la mejor manera el caso a modelar.

Al revisar detenidamente las características de cada uno de los métodos que tiene ANSYS-CFX. Por eso se debe seleccionar el método más indicado para el caso analizado en esta tesis de grado.

Una vez revisado las características de todos los métodos, se llega a determinar que una buena opción a emplearse es el *mallado tetraédrico* (tetraedros).

3.4.2.2 Generación de la malla. Para la generación de la malla se debe realizar el proceso de discretización del espacio donde actúa el flujo del fluido por analizar (el fluido dentro de la tubería).

Este volumen por analizar se divide en pequeñas secciones celdas, es decir se genera una red. En el método de volumen finito, estos puntos se unen mediante líneas de la malla para formar caras, las cuales se agrupan para formar un conjunto de volúmenes de control y realizar los cálculos numéricos en el centro de cada uno de estos volúmenes.

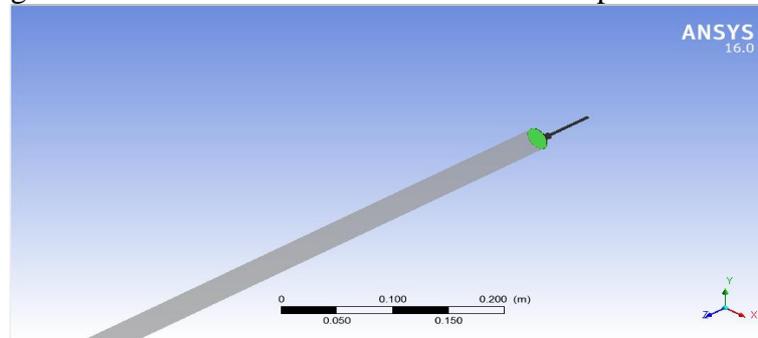


Fuente: (CIMBALA, 2006)

Para el procedimiento de solución se elige un dominio computacional y se genera una malla conocida también como red de nodos, el dominio se divide en muchos elementos llamados celdas. Para dominios de dos dimensiones (2-D) las celdas son áreas y para los dominios tridimensionales (3-D) las celdas son volúmenes.

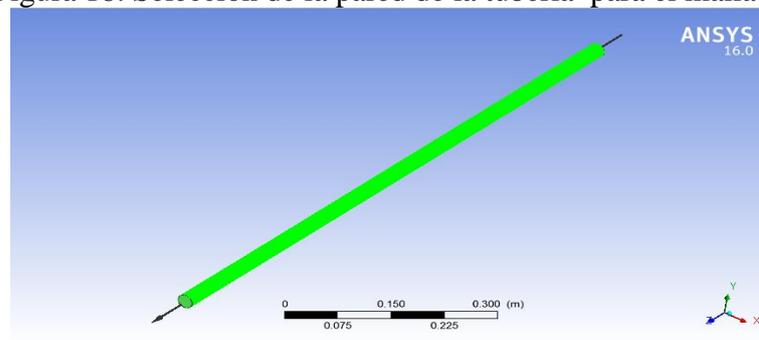
Por tal razón, al obtener una malla más fina las aproximaciones serán más exactas, ya que se hace el cálculo numérico en una mayor cantidad de puntos, además el espacio entre nodos será mayor y la información pasa de un nodo a otro de una manera más precisa.

Figura 17. Selección de la entrada de la tubería para el mallado



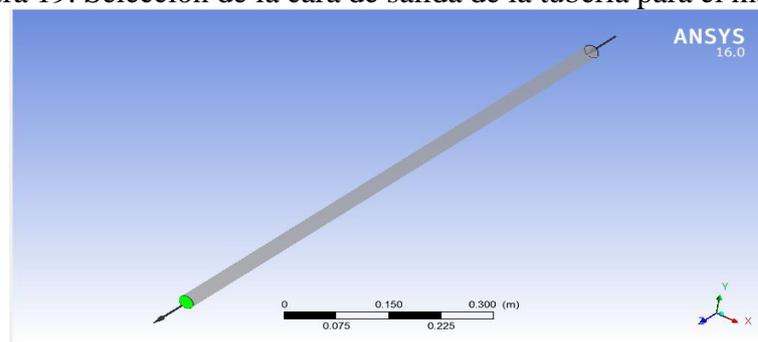
Fuente: Autor

Figura 18. Selección de la pared de la tubería para el mallado



Fuente: Autor

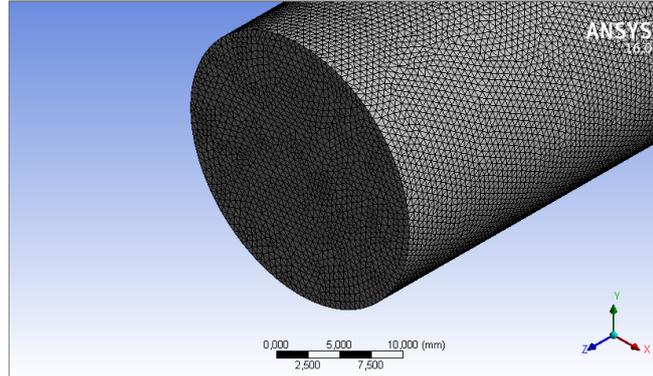
Figura 19. Selección de la cara de salida de la tubería para el mallado



Fuente: Autor

En la figura 21 podemos observar el detalle de mallado generado en ANSYS-CFX mesh para la tubería de un diámetro de pulgada. El dominio está constituido por el número total de elementos de 5'902819 y el de los nodos a 1'114599. Por lo que se puede considerar un dominio indeterminadamente grande.

Figura 20. Geometría mallada en tubería de 1 plg



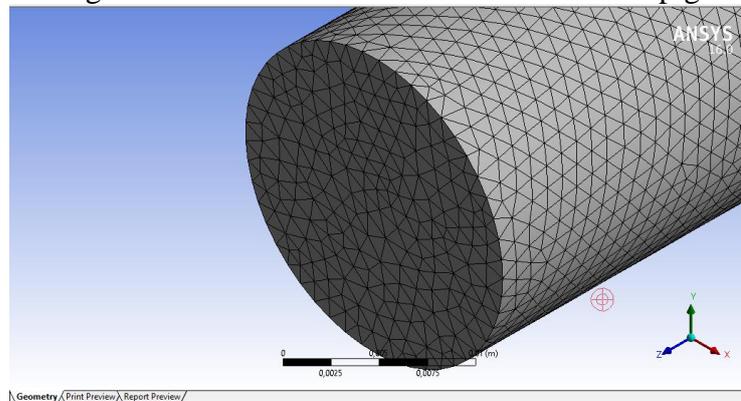
Fuente: Autor

Figura 21. Detalle del mallado para tubería de 1 plg

Details of "Mesh"	
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Default (0,448320 mm)
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeaturing Tolerance	Default (0,249070 mm)
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1114599
<input type="checkbox"/> Elements	5902819

Fuente: Autor

Figura 22. Geometría mallada en tubería de ¾ plg

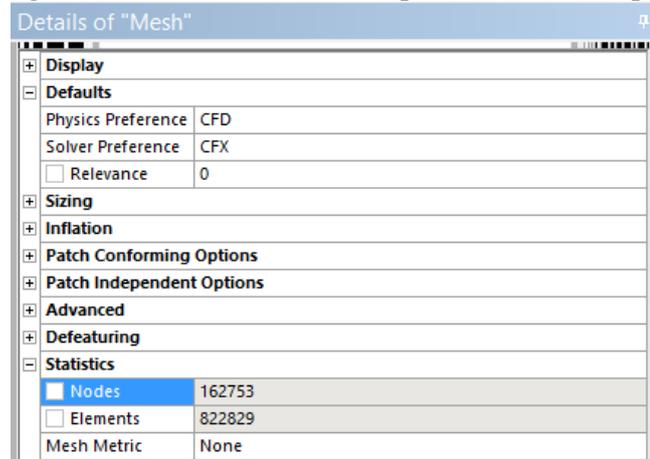


Fuente: Autor

En la figura 23 se observa el detalle del mallado generado en ANSYS-CFX mesh para la tubería de diámetro de tres cuartos de pulgada. En el dominio el número total de elementos 162 753 y el de los nodos 822 829.

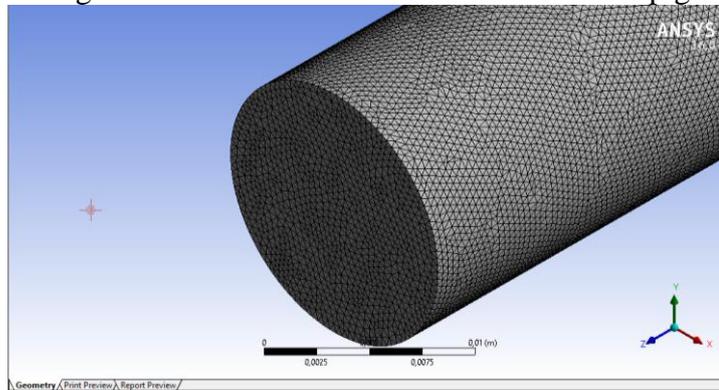
En la figura 25 se observa el detalle del mallado generado para la tubería de diámetro de media pulgada. En el dominio el número total de elementos 6'463102 y el de los nodos 1'244071, considerando un dominio indeterminadamente grande.

Figura 23. Detalle del mallado para tubería de 3/4 plg



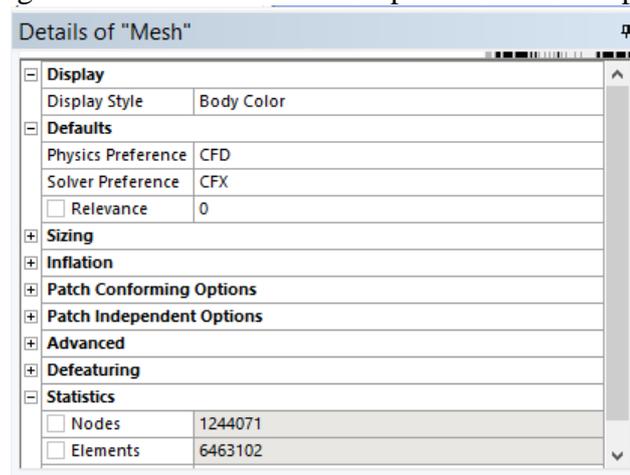
Fuente: Autor

Figura 24. Geometría mallada en tubería de 1/2 plg



Fuente: Autor

Figura 25. Detalle del mallado para tubería de 1/2 plg



Fuente: Autor

3.4.2.3 Calidad del mallado. La calidad de la malla juega un papel significativo en la exactitud y estabilidad del cómputo numérico. Sin tener en cuenta el tipo de malla usado

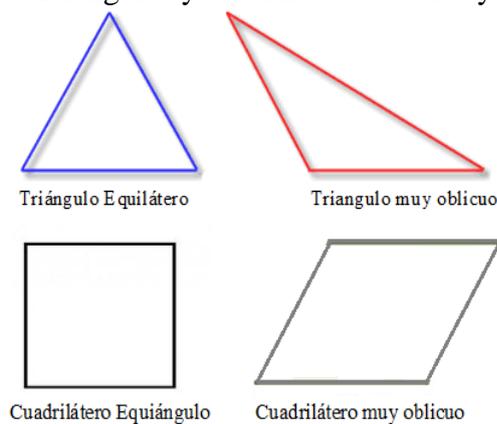
en su dominio, verificar la calidad de su malla es esencial, también enfoca a la simetría de los elementos que conforman el dominio.

Los métodos para establecer la calidad de un elemento con respecto a otro en función de su simetría son los siguientes;

- Área
- Relación de aspecto
- Relación de lados
- Relación de diagonales
- Asimetría angular
- Asimetría de tamaño
- Asimetría de ángulo medio
- Estiramiento
- Cambio de tamaño
- Conicidad

En el mallado CFD, ANSYS CFX usa el método de revisión de forma basado en la relación de aspecto, volumen del elemento y ángulo de las caras. Este recomienda como estándar usar el criterio de “oblicuidad” (skewness) para calificar la calidad de mallado.

Figura 26. Triángulos y cuadriláteros ideales y oblicuos.



Fuente: Autor

El criterio de “oblicuidad” (skewness) es uno de los principales métodos para establecer la calidad de un mallado. Este determina la simetría y la oblicuidad de los elementos. En la figura 26 se puede observar este criterio.

En la tabla 4, muestra la escala de los valores de oblicuidad y su correspondiente interpretación de la calidad del elemento. Considerando el concepto de oblicuidad, este indica un valor de 0 para un elemento equilátero (mejor elemento), y 1 para definir un elemento completamente degenerado (peor elemento). Se caracteriza un elemento completamente degenerado por tener sus nodos muy cercas, es decir casi coplanares.

Tabla 4. Valores de oblicuidad e indicadores de calidad

Valores de oblicuidad	Indicadores de calidad
1	Degenerado
0,90 - < 1	Muy malo
0,75 - 0,90	Pobre
0,50 - 0,75	Regular
0,25 - 0,50	Bueno
> 0 - 0,25	Excelente
0	Equilátero perfecto

Fuente: (BAKKER, 2012)

En la calidad del mallado se busca la simetría de los elementos debido a que las ecuaciones son resueltas en CFD asumen de que los elementos son relativamente equiláteros y equiángulares.

Para determinar la oblicuidad existen dos métodos;

- Método basado en volúmenes equiláteros (solo se aplica en triángulos y tetraedros)

$$oblicuidad = \frac{\text{tamaño óptimo del elemento} - \text{tamaño del elemento}}{\text{tamaño óptimo del elemento}} \quad (48)$$

El tamaño óptimo del elemento es un elemento equilátero con un mismo radio de circunscripción, el valor de la oblicuidad se determina a partir de la (ecuación 48). En los volúmenes de los tetraedros.

- Método basado en la desviación de un ángulo equilátero normalizado (siempre se aplica en prismas y pirámides).

$$oblicuidad = \text{mayor valor} \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (49)$$

Donde;

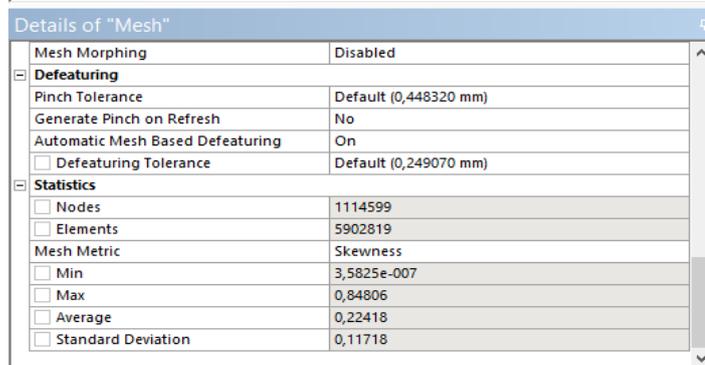
θ_{max} = Mayor ángulo en la celda o la cara

θ_{min} = Menor ángulo en la celda o la cara

θ_e = Angulo equiángulo para una celda o una cara (60° para triángulos, y 90° para cuadrilátero).

3.4.2.4 Análisis de la calidad del mallado. En la parte del ANSYS-MESH tiene la opción de revisar la calidad del mallado como se indica en la figura para cada diámetro de tubería.

Figura 27. Detalle de la calidad de mallado en la tubería de 1 plg

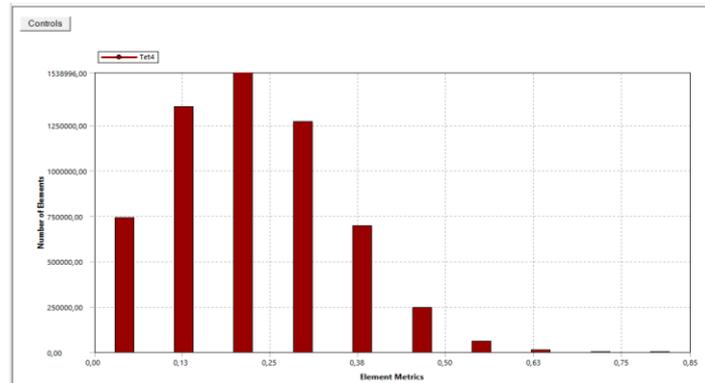


Details of "Mesh"	
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Default (0,448320 mm)
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeaturing Tolerance	Default (0,249070 mm)
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1114599
<input type="checkbox"/> Elements	5902819
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3,5825e-007
<input type="checkbox"/> Max	0,84806
<input type="checkbox"/> Average	0,22418
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11718

Fuente: Autor

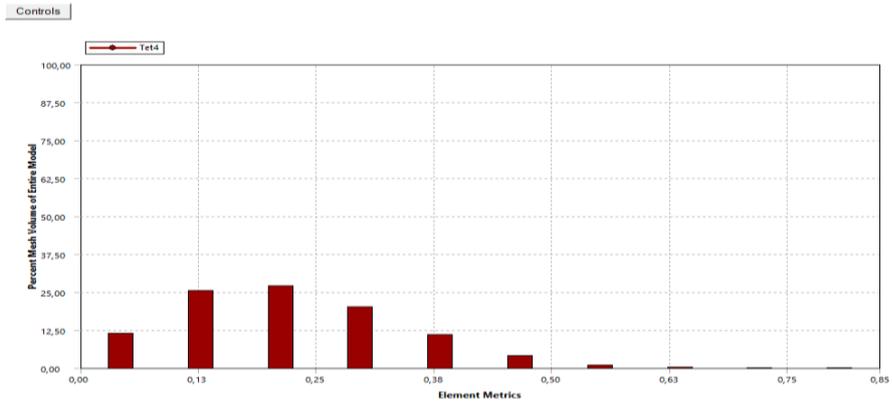
En el modelo en la tubería del diámetro de una pulgada se puede observar que la geometría con un mallado no estructurado tiene una calificación promedio de 0,2242 (Average). En la tabla 4 nos indica que es un mallado excelente, también podemos analizar que el valor mínimo mejor es 3,5825E-007 y también el valor máximo peor es 0,848.

Figura 28. Calidad de mallado vs número de elementos en el dominio 1 plg



Fuente: Autor

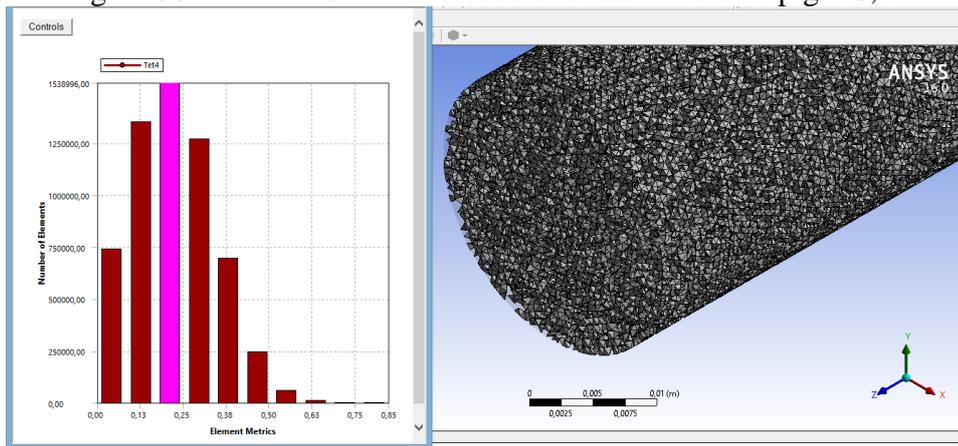
Figura 29. Calidad de mallado vs porcentaje de elementos en el dominio de 1 plg



Fuente: Autor

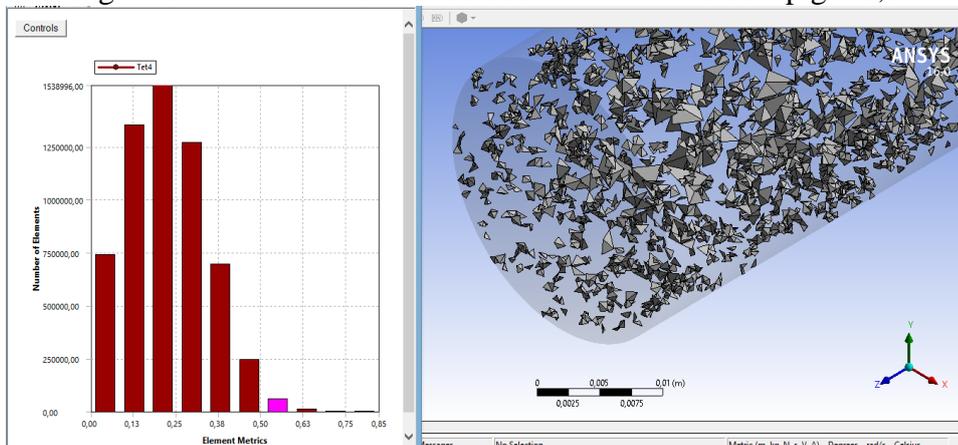
En la figura 28 y la figura 29 determinamos que hay aproximadamente un 63 % de elementos de excelente calidad con una calificación menor a 0,21; mientras que un porcentaje del 3 % supera el valor de 0,5.

Figura 30. Elementos de oblicuidad en el dominio de 1 plg < 0,21



Fuente: Autor

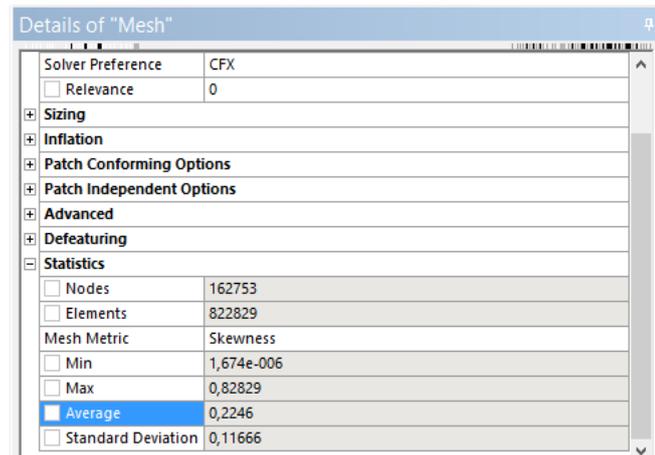
Figura 31. Elementos de oblicuidad en el dominio de 1 plg > 0,5



Fuente: Autor

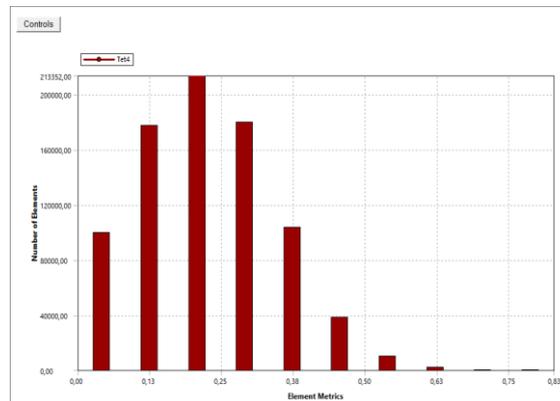
En el modelo en la tubería tres cuartos de pulgada se puede observar que la geometría tiene una calificación promedio de 0,2246 (Average). En la tabla 4 nos indica que es un mallado excelente, también podemos analizar que el valor mínimo mejor es 1,674E-006 y también el valor máximo peor es 0,828.

Figura 32. Detalle de la calidad de mallado en la tubería de ¾ plg



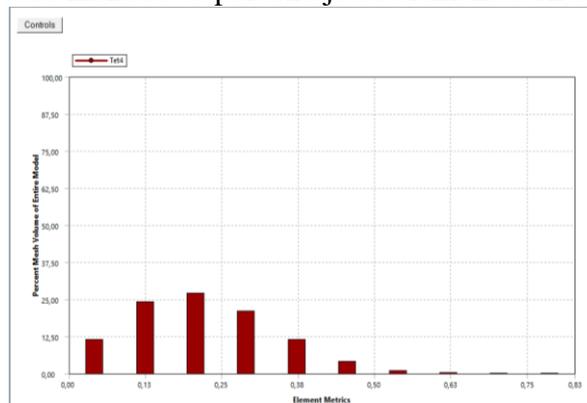
Fuente: Autor

Figura 33. Calidad de mallado vs número de elementos en el dominio de ¾ plg



Fuente: Autor

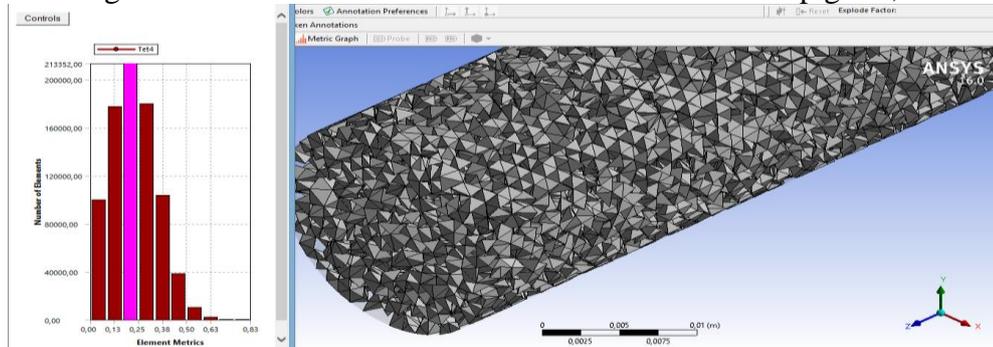
Figura 34. Calidad de mallado vs porcentaje de elementos en el dominio de ¾ plg



Fuente: Autor

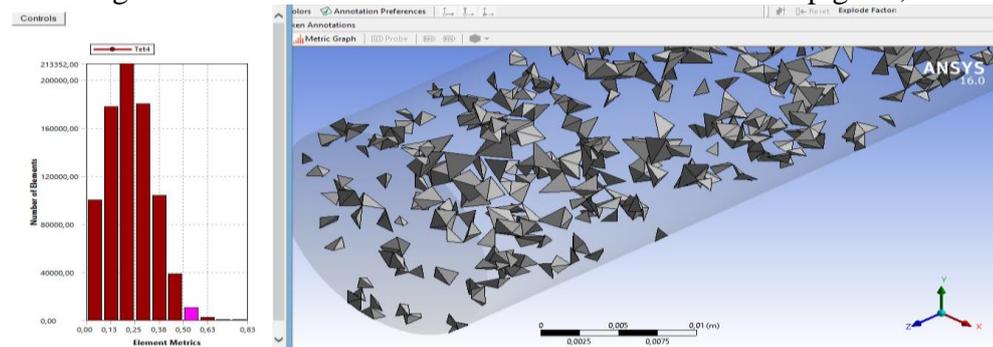
En la figura 33 y la figura 34 determinamos que hay aproximadamente un 61 % de elementos de excelente calidad con una calificación menor a 0,212, mientras que un porcentaje del 2 % supera el valor de 0,5.

Figura 35. Elementos de oblicuidad en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg $< 0,21$



Fuente: Autor

Figura 36. Elementos de oblicuidad en el dominio de $\frac{3}{4}$ plg $> 0,5$



Fuente: Autor

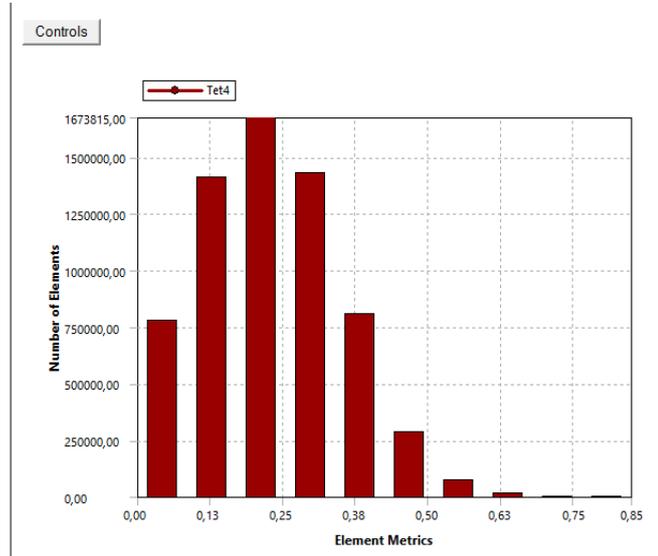
Figura 37. Detalle de la calidad de mallado en la tubería de $\frac{1}{2}$ plg

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1244071
<input type="checkbox"/> Elements	6463102
Mesh Metric: Skewness	
<input type="checkbox"/> Min	1,195e-007
<input type="checkbox"/> Max	0,84988
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0,22934
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11852

Fuente: Autor

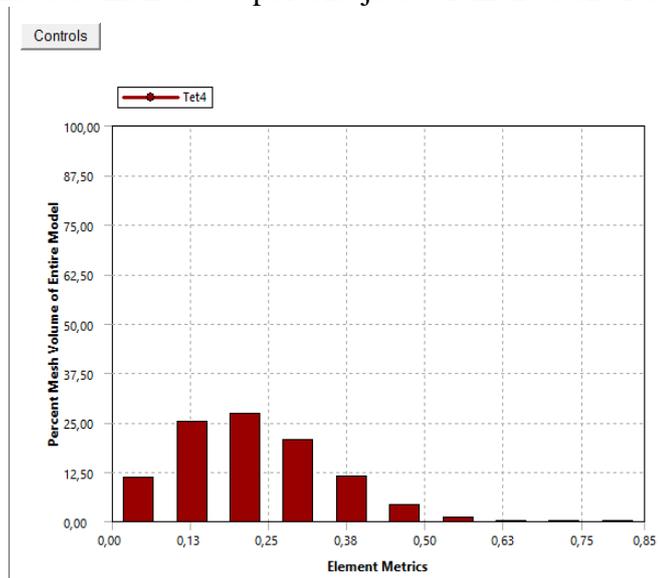
En el modelo en la tubería del diámetro de media pulgada se puede observar que la geometría tiene una calificación promedio de 0,2293 (Average). En la tabla 4 nos indica que es un mallado excelente, también podemos analizar que el valor mínimo mejor es 1,195E-007 y también el valor máximo peor es 0,849.

Figura 38. Calidad de mallado vs número de elementos en el dominio de ¾ plg



Fuente: Autor

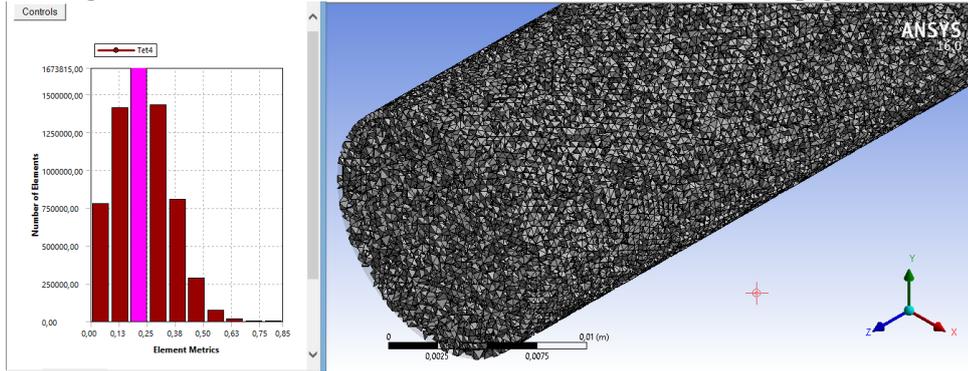
Figura 39. Calidad de mallado vs porcentaje de elementos en el dominio de ¾ plg



Fuente: Autor

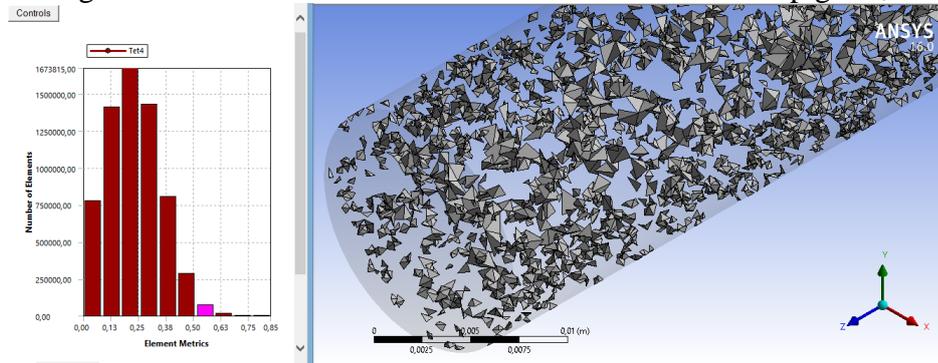
En la figura 38 y la figura 39 determinamos que hay aproximadamente un 63 % de elementos de excelente calidad con una calificación menor a 0,21; mientras que un porcentaje del 2 % supera el valor de 0,5.

Figura 40. Elementos con oblicuidad en el dominio de $\frac{1}{2} \text{ plg} < 0,21$



Fuente: Autor

Figura 41. Elementos con oblicuidad en el dominio de $\frac{1}{2} \text{ plg} > 0,5$



Fuente: Autor

3.4.3 Definición de propiedades y condiciones de frontera. Para determinar las condiciones de frontera, se realiza un análisis al modelo geométrico de las tuberías donde, se interpreta que el modelo tiene tres caras. Una pertenece a la entrada del agua, la segunda pertenece a la salida del agua y la tercera es la pared de la tubería.

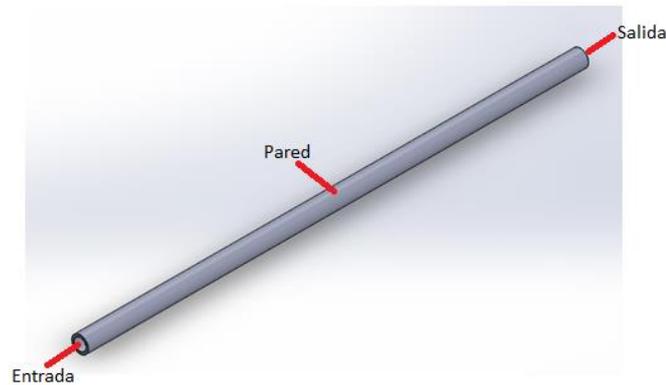
En el banco tuberías se realiza la prueba experimental que se describe en el capítulo cuatro por lo tanto se a simulado en CFD. Es el objetivo principal de esta tesis de grado posteriormente se verificaran los datos experimentales con los datos obtenidos en la simulación. A continuación se establece previamente las condiciones de funcionamiento del banco de pruebas.

- El agua se encuentra fluyendo en el banco de tuberías, para realizar el análisis en sus respectivos tramos
- Se procede a cerrar las dos válvulas de compuerta en los dos tramos para realizar la toma de datos en uno solo de sus ramales.

- Con el cierre repentino de una válvula de compuerta se procede a dar las aperturas para la adquisición de datos en cada tramo.

Una vez que se tiene establecidas las condiciones a simular, se asignan los nombres correspondientes a cada cara y luego se establecen las condiciones de borde en cada una de ellas, este procedimiento se realiza para cada diámetro de tubería.

Figura 42. Asignación de nombres a caras de la geometría



Fuente: Autor

3.4.3.1 Entrada. La condición de borde tipo entrada se utiliza para definir la región de entrada y las propiedades de entrada del flujo al dominio. En ANSYS CFX-pre permite ingresar las siguientes propiedades una componente de velocidad, presión y el caudal másico.

Para nuestro caso de simulación ingresamos la presión total de entrada tomada en el respectivo tramo de la tubería.

Tabla 5. Parámetros de la condición de región tipo entrada.

Entrada [Inlet]	
Tipo de condición de borde	Inlet
Definición de la condición	Presión
Presión	Presión total
Turbulencia	Intensidad media 5%

Fuente: Autor

3.4.3.2 Salida. La condición de salida se identifica para definir la región de salida para proceder a ingresar las presiones tomadas en los tres tramos diferentes a la salida del sistema de circulación del fluido por cada tramo de tubería, para obtener una caída de

presión en el metro de tubería durante la prueba experimental con diferentes aperturas, contralada con la válvula de compuerta.

La presión que se ingresa a la salida es la estática, ya que nos facilita el software, para un análisis más preciso de la simulación del fluido y obtener un perfil de velocidad.

Tabla 6. Parámetros de la condición de región tipo salida.

Salida [Outlet]	
Tipo de condición de borde	Outlet
Definición de la condición	Presión
Presión	Presión estática
Turbulencia	Intensidad media 5%

Fuente: Autor

3.4.3.3 Pared. La pared en ANSYS CFX se define como la con condición de “no deslizamiento” (no slip Wall). Para realizar la simulación CFD lo más próximo a la realidad se tomara el valor de la rugosidad absoluta $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$ correspondientes a tuberías de PVC.

Tabla 7. Parámetros de la condición de región tipo pared.

Pared	
Tipo de condición de borde	Pared
Definición de la condición	Rugosidad
Rugosidad de las paredes	0,0015 mm
Pared del fluido	Agua

Fuente: Autor

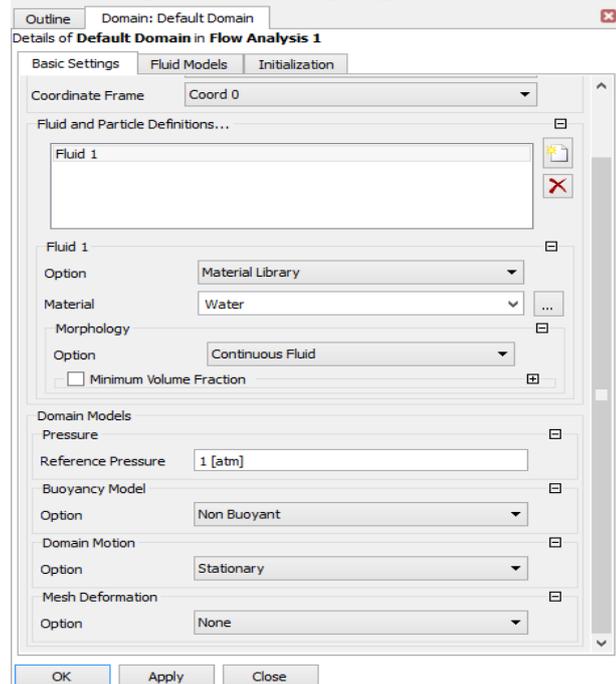
3.5 Procesamiento

En esta etapa ANSYS-CFX soluciona las ecuaciones de Navier-Stokes de fluido incompresible, de tal forma que es en el principio de las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento. Para analizar en el dominio computacional aplicando el método de volúmenes finitos.

3.5.1 Resolución en estado estacionario (estable). En la solución del modelo matemático de flujo incompresible turbulento. La simulación del fluido en el interior de las tuberías se realizan en estado estacionario.

3.5.1.1 Propiedades del fluido. En el banco de pruebas para la simulación, el fluido es agua a temperatura ambiente (15 °C), para el análisis se utilizan las propiedades que tiene el ANSYS-CFX. En la figura 43 se indica todas las propiedades para la solución estacionaria. Para análisis de estado estable la densidad se considera constante para fluido incompresible, el software considera por defecto la densidad de los fluidos como constantes.

Figura 43. Propiedades del agua para simulación estable



Fuente: Autor

3.5.2 Cálculo. El software para la resolución del sistema de ecuaciones para la discretización de las ecuaciones gobernantes, aplica el método multi malla. Esta técnica soluciona las ecuaciones mediante un proceso iterativo.

Esta técnica de aproximación nos permite solucionar problemas de este tipo, debido a la rapidez con que las ecuaciones discretas son resueltas sobre un volumen de control. La técnica acelera la convergencia de solución aplicando una o varias mallas virtuales más gruesas que la original.

3.5.3 Intensidad de turbulencia. Para la simulación de los fluidos en las tuberías especificamos la intensidad de turbulencia ya que es un parámetro básico de la turbulencia, para la solución del análisis en estado estable.

Dentro de los parámetros de la condición de frontera a la entrada para la simulación del fluido en estado estable nos permite seleccionar la opción de intensidad de turbulencia. El software tiene tres alternativas de intensidad de turbulencia considerando 1% baja, 5% media y 10% alta.

Para nuestro caso especificamos la intensidad de turbulencia calculando con la siguiente ecuación.

$$I_{turb} = 0.16[Re]^{-1/8} \quad (50)$$

$$I_{turb} = 0.16 \left[\frac{\rho v D}{\mu} \right]^{-1/8}$$

Donde;

Re = El número de Reynolds

ρ = Densidad del agua [kg/m³]

v = Velocidad del fluido [m/s²]

D = Diámetro interno [m]

μ = Viscosidad dinámica de fluido [N.s/m²]

Para calcular la intensidad de turbulencia procedemos a realizar con los valores de las velocidades calculadas en la adquisición de datos durante la práctica de pérdidas primarias en el banco de pruebas.

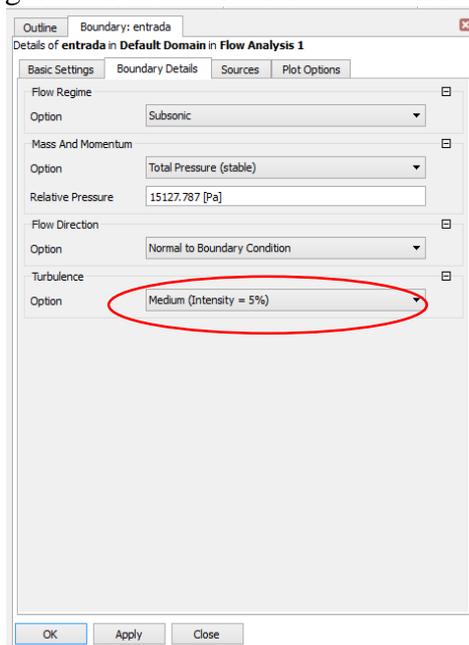
Tabla 8. Valores de Intensidad de turbulencia

Diámetro interno [mm]	Velocidad [m/s]	Intensidad de turbulencia [%]
24,300	2,08	4,38
18,847	5,47	4,25
13,860	3,38	4,16

Fuente: Autor

El resultado de aplicar la ecuación de la intensidad de turbulencia con las velocidades promedios, nos proporciona valores menores al 5 % en los tres tramos de tuberías con sus respectivas velocidades. En base a los valores calculados se escoge la opción de Turbulencia media (Intensidad = 5%) como se indica en la figura 44.

Figura 44. Configuración de la turbulencia a la entrada de las tuberías.



Fuente: Autor

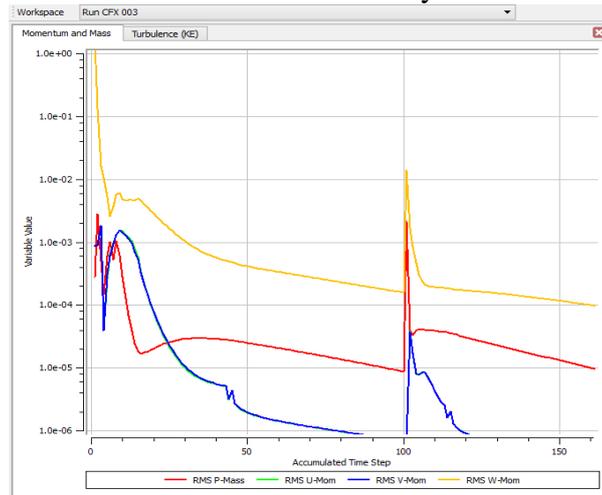
3.5.4 *Análisis de convergencia.* Esta etapa del procesamiento es muy importante, para monitorear la convergencia empleando gráficos que actualizan en función del proceso iterativo. Prácticamente la graficas vienen a ser monitores de convergencia del análisis requerido.

Para la solución estable se ejecuta el programa de la CFD ANSYS-CFX para los análisis de los seis casos. Puesto que el flujo es turbulento, incompresible, donde se resuelve las ecuaciones: de continuidad, de cantidad de movimiento lineal en x y de cantidad de movimiento lineal en y . Note que la coordenada y se usa en el paquete CFD en vez de r como la distancia desde el eje hasta la pared de la tubería.

El paquete de la CFD se corre hasta lograr la convergencia (que los residuos se estabilicen). Recuerde que un residuo es una medida de que tanto se desvía la solución numérica de la ecuación dada del valor exacto de la solución; a menor residuo, mejor convergencia.

Para el caso de la simulación del flujo turbulento estacionario esto ocurre en casi 170 iteraciones para todos los análisis y los residuos se estabilizan en menos de $1.0E-04$ respecto a sus valores iniciales. La disminución de los residuos se grafica en la figura 48 para el caso de volúmenes tetraédricos en el dominio computacional.

Figura 45. Análisis de la ecuación de continuidad y velocidad en la tubería de 1 plg

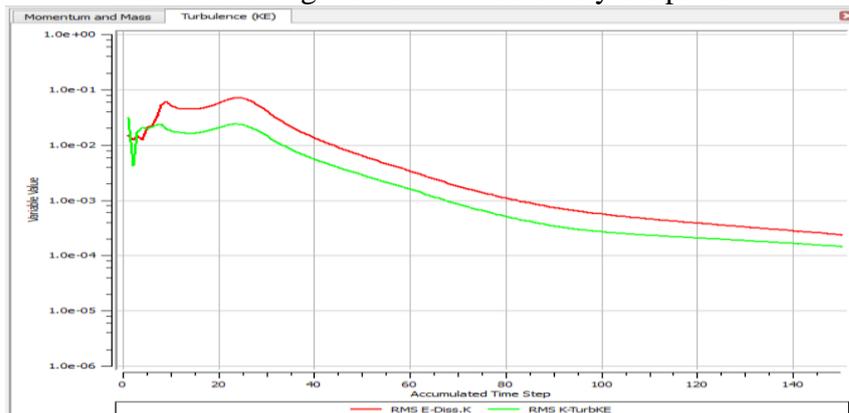


Fuente: Autor

Los controles de la convergencia de la solución se hacen mediante la ecuación de la continuidad, de la cantidad de movimiento, de la disipación turbulenta y de la energía cinética turbulenta. No se considera la ecuación de conservación de la energía debido a que no se estableció la existencia de transferencia de calor en el modelo.

Residuales de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta como se indica en la figura 46, los residuos se estabilizan en menos de $1.0e-03$ esto ocurre en 160 iteraciones.

Figura 46. Análisis de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta.



Fuente: Autor

3.6 Post-procesamiento

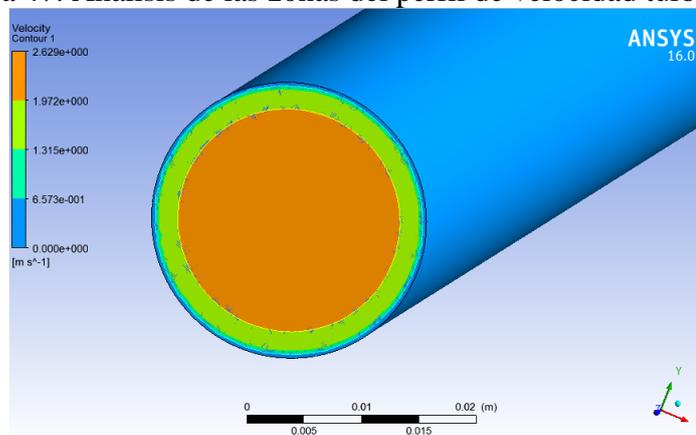
El post-procesamiento es la etapa de análisis e interpretación de los resultados obtenidos de la solución son presentados de forma visual sobre el modelo, con herramientas de

contorno, líneas de corriente, trayectoria de partícula, de manera que pueden analizarse los dominios para obtener una perspectiva de la solución del problema.

3.6.1 *Análisis de resultados.* Los resultados de solución en estado estable en CFD es el análisis de los perfiles de velocidad en los tres tramos de tuberías con diferentes aperturas. En la simulación solo analizamos perfiles de velocidad de flujo turbulento, este tipo de flujo es más evidente en las prácticas reales, la simulación del fenómeno físico se indica en la figura 47.

En el siguiente gráfico se observa detenidamente las cuatro zonas en el flujo turbulento.

Figura 47. Análisis de las zonas del perfil de velocidad turbulento.



Fuente: Autor

Tabla 9. Características de las zonas de flujo turbulento

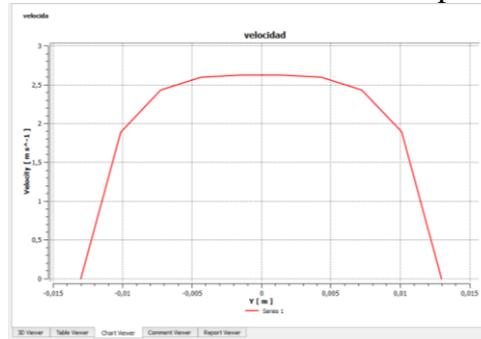
Tipo de zonas	Características
Zona viscosa	<ul style="list-style-type: none"> • Los efectos viscosos son dominantes. • El perfil de velocidad en esta zona es casi lineal. • Las líneas de corriente de flujo son aproximadamente paralelas como en el flujo laminar.
Zona de amortiguamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Los efectos turbulentos se vuelven significativos. • El flujo todavía es dominado por los efectos viscosos sobre la zona de amortiguamiento.
Zona de traslape	<ul style="list-style-type: none"> • También conocida como la zona de transición o subzona inercial. • Los efectos turbulentos son mucho más significativos, pero todavía sin dominar.
Zona turbulenta	<ul style="list-style-type: none"> • Esta es la zona donde, los efectos turbulentos dominan sobre los efectos de difusión molecular.

Fuente: Autor

En el flujo turbulento encontramos cuatro zonas en la simulación del fluido a lo largo de la pared de la tubería con mayor detalle el análisis se indica en la tabla 9.

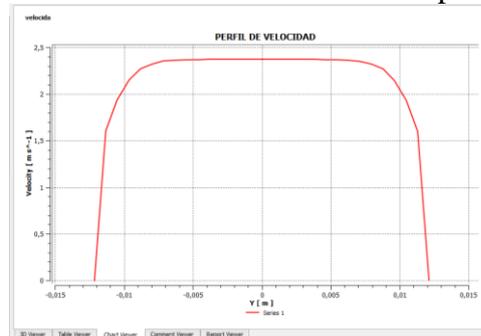
3.6.1.1 Perfil de velocidad en tubería de 1 plg. En la etapa del post-procesamiento realizamos el cálculo de los perfiles de velocidad.

Figura 48. Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 7 vuelta



Fuente: Autor

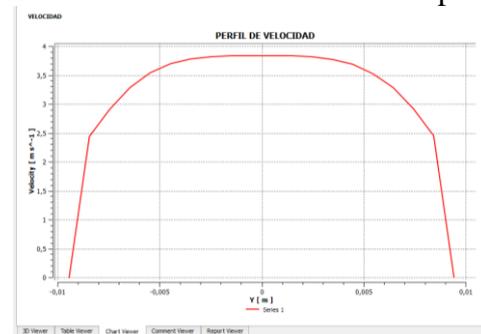
Figura 49. Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 1 vuelta



Fuente: Autor

3.6.1.2 Perfil de velocidad en tubería de $\frac{3}{4}$ plg. Para obtener la energía cinética de un flujo laminar en un tubo, se debe tomar en consideración el promedio del cuadrado de la velocidad para el perfil de la velocidad.

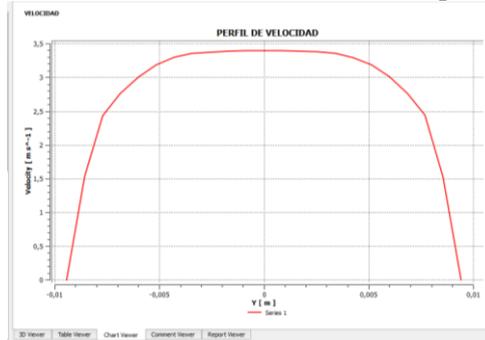
Figura 50. Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 7 vuelta



Fuente: Autor

Las velocidades en el interior de la tubería no están uniformemente distribuidas. Esto se explica por los efectos de la resistencia cortante del fluido.

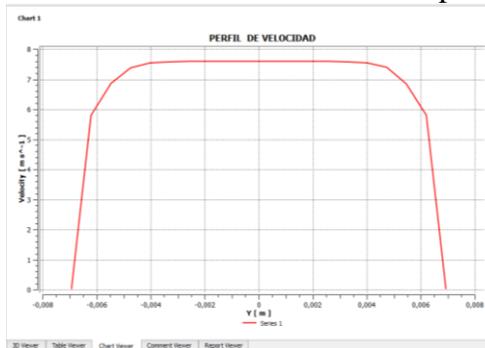
Figura 51. Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 1 vuelta



Fuente: Autor

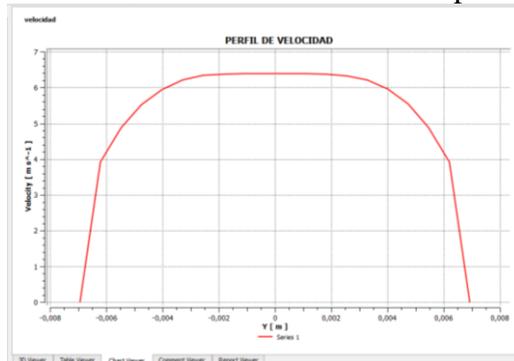
3.6.1.3 Perfil de velocidad en tubería de $\frac{1}{2}$ plg.

Figura 52. Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 7 vuelta



Fuente: Autor

Figura 53. Perfil de velocidad turbulento en la apertura de 1 vuelta



Fuente: Autor

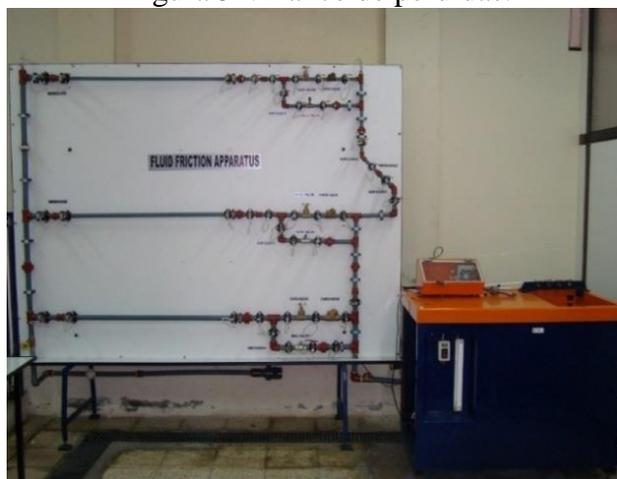
CAPÍTULO IV

4. MEDICIONES EXPERIMENTALES

4.1 Evaluación actual del Banco de pérdidas

Se realizó la evaluación del banco de pérdidas, que está ubicado en el laboratorio de turbomaquinaria y una vez revisado el banco de pérdidas no se encontraba en un buen funcionamiento el banco de tuberías y el tablero de control.

Figura 54. Banco de pérdidas.



Fuente: Autor

Los problemas encontrados en el banco de tuberías son los siguientes:

- Fugas en los collarines de las tomas de presión en el banco.
- El tablero de control no se encontró operativo por la descalibración de la instrumentación eléctrica.

Calibración del sensor de presión tipo PX 302. La calibración de los sensores consiste en el cálculo de la ecuación característica para determinar su comportamiento. Esto se refiere a la ecuación que determina la razón de cambio en la variable de salida. Generalmente de índole físico o viceversa, el cálculo de la razón de cambio de la variable de entrada. La calibración de los sensores resulta esencial para obtener valores que generen mediciones con un buen nivel de exactitud para la simulación del fenómeno físico.

4.1.1 Procedimiento para la calibración del sensor de presión tipo PX 302. Para la calibración de los sensores de presión se utilizó los siguientes instrumentos.

- Tarjeta NI-USB 6211.
- Calibrador de manómetros.

Para la calibración se procede a instalar los sensores de presión en el calibrador de manómetros como se indica en la figura 55.

Figura 55. Calibrador de manómetros



Fuente: Autor

Tabla 10. Mediciones de presión y Voltaje en el sensor para 30 psi

Voltaje [V]	Presión [PSI]	Voltaje [V]	Presión [PSI]
-0,431	0	2,23	16
0,670	1	2,35	17
0,740	2	2,46	18
0,900	3	2,55	19
1,010	4	2,64	20
1,080	5	2,77	21
1,240	6	2,88	22
1,330	7	3,00	23
1,430	8	3,08	24
1,540	9	3,19	25
1,630	10	3,33	26
1,730	11	3,44	27
1,840	12	3,60	28
1,950	13	3,74	29
2,040	14	3,87	30
2,150	15		

Fuente: Autor

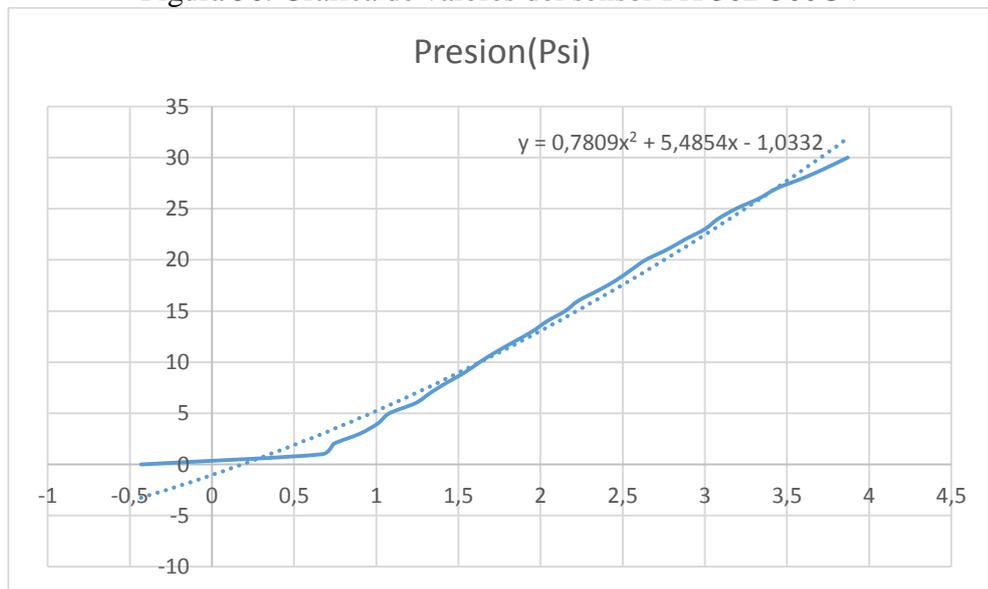
A través de la bomba neumática damos valores de presión, estos valores de presión se observan en el manómetro patrón mientras el valor de voltaje correspondiente se registra a la salida del sensor en la interfaz de LabVIEW en el computador.

Una vez realizadas las mediciones, se procedió a obtener graficas de voltaje versus presión para comprobar que los sensores.

El sensor PX 302 se utiliza para la medición de presión en una escala de 30 psi en el banco de pruebas. En la tabla se observan las mediciones realizadas para los sensores al aplicar la presión de 0 a 30 psi en el tramo de tubería de ½ plg y registrando los valores de presión a la salida del sensor.

Con los valores determinados en la tabla 10 se realiza la gráfica de voltaje vs presión como se indica en la figura 56 con el fin de encontrar la ecuación característica que representa el valor de las presiones a cierto valor de voltaje dado por el sensor.

Figura 56. Grafica de valores del sensor PX 302-300GV



Fuente: Autor

Con la gráfica originada como se indica en la figura 59 se verifica la ecuación cuadrática a la salida del sensor. La ecuación cuadrática se representa a continuación para el sensor de 30 psi.

$$y = 0,7809x^2 - 5,4854x - 1,0332 \quad (51)$$

4.1.1.1 Características de los transductores de presión salida tipo cable (PX302). El transductor de presión modelo PX-302 es un sensor que mide en un rango de presión de 0 a 30 psi.

La presión de prueba es de 13.000 psi máx, la temperatura de funcionamiento es de -18 a 71 °C con un tiempo de respuesta de 1 ms la vida típica del transductor de presión es de 100 millones de ciclos.

Figura 57. Transductor de presión PX302



Fuente: (OMEGA Engineering, 2015)

Especificaciones principales del sensor:

- Excitación: 10 Vcc (5 a 15 Vcc límites).
- Salida: 100 mV \pm 10 mV.
- Resistencia de entrada: 15.000 Ω máximo.
- La vida típica: 100 millones de ciclos.
- Temperatura de funcionamiento: -18 a 71 °C (0 a 160 ° F).
- Presión de prueba: 200%, 13.000 psi máx.
- Tiempo de respuesta: 1 ms
- Vibración: 10 a 2000 Hz
- Conexión eléctrica:
- PX302: 1 m de cable blindado de 4 conductores.
- Peso: 131 gr.

4.1.1.2 Características del calibrador de manómetros. Es una bomba neumática de presión ADT-914 de accionamiento manual diseñada para generar la presión de -14 psi (-0.95 bares) a 375 psi (25 bares).

El tornillo de alta calidad que es parte de la prensa está diseñado para el ajuste de presión.

Con una resolución de ajuste de hasta 10 Pa (0,1 mbar). Una válvula especial de cierre hace que la presión sea lo más estable posible durante la calibración. Un aislador de gas-líquido integrado protege la bomba de humedad y la suciedad para reducir las necesidades de mantenimiento.

Dos conectores apretados a mano instalados en la bomba permiten una fácil conexión y desconectar de la bomba de prueba sin necesidad de cinta o llaves. El ADT-914 es una bomba de prueba de comparación ideal para la presión de la calibración de instrumentos.

Figura 58. Bomba neumática de mano Additel 914



Fuente: (Temperature Instrumentation, 2015)

Especificaciones principales de la bomba neumática:

- Mide: Aire
- Rango de presión generada: 95 % de vacío a 375 psi (25 bar) de presión positiva
- Resolución de ajuste: 10 Pa (0,1 mbar).
- Material: aluminio SST.
- Cuerpo: SST / aluminio
- Sellos: Buna - N
- Volumen del pistón: 21 ml (1,3 plg³)
- Conexión:
- Conectores a mano apretada tanto para medidor de prueba y medidor de referencia.
- Conexión del manómetro de prueba: 1/4NPT hembra, 1/4BSP hembra M20x1,5
- Referencia calibre de conexión: 1/4NPT hembra, 1/4BSP hembra
- Dimensiones:
- Altura: 5,12 plg (130 mm)
- Base: 9,45 plg (240 mm) x 4,72 plg (120 mm)
- Peso: 3,3 libras (1,5 kg)

- Garantía: 1 año

4.1.1.3 Características de NI USB 6211. El módulo USB-6211 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de un solo canal a 250 ks/s, dos salidas analógicas, cuatro líneas de entrada digital, cuatro líneas de salida digital, cuatro rangos de entrada programable (de ± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

El módulo NI USB-6211 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tornillo mantiene los precios bajos y simplifica las conexiones de señal. Este producto no requiere potencia externa.

Este módulo también cuenta con la nueva tecnología NI Signal Streaming la cual permite transferencia de datos bidireccional a alta velocidad parecida a DMA a través del bus USB.

Figura 59. Tarjeta de adquisición NI-USB 6211.



Fuente: (OMEGA Engineering, 2015)

Especificaciones principales de la tarjeta NI-USB 6211:

- 16 entradas analógicas (16 bits, 250 ks/s).
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 ks/s), 4 entradas digitales, 4 salidas digitales, 2 contadores de 32 bits.
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad y facilidad de conectividad con una señal integrada forma parte de la tarjeta de adquisición de datos.

- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible.
- Compatible con LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET.
- Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW Signal Express LE para registro de datos.

4.2 Metodología de adquisición de datos

En esta etapa se desarrolla el análisis de los perfiles de velocidad mediante los cálculos analíticos, como es el objetivo la simulación, con la ayuda de la adquisición de datos reales del banco de pérdidas para realizar una respectiva comparación de resultados con la simulación de CFD y para la pertinente validación del simulación desarrollada en el capítulo anterior en los diferentes diámetros de la tubería.

Esta es la forma de validar un desarrollo metodológico de simulación numérica de este fenómeno y poder utilizar confiablemente para casos reales en instalación hidráulicas de sistemas de tuberías.

4.2.1 Descripción del banco de pérdidas. El banco de pérdidas de Turbomaquinaria y Laboratorio está conformado por tres partes como son: el reservorio, el banco de tuberías y la bomba como se indica en la figura 60.

Figura 60. Banco de pérdidas automatizado



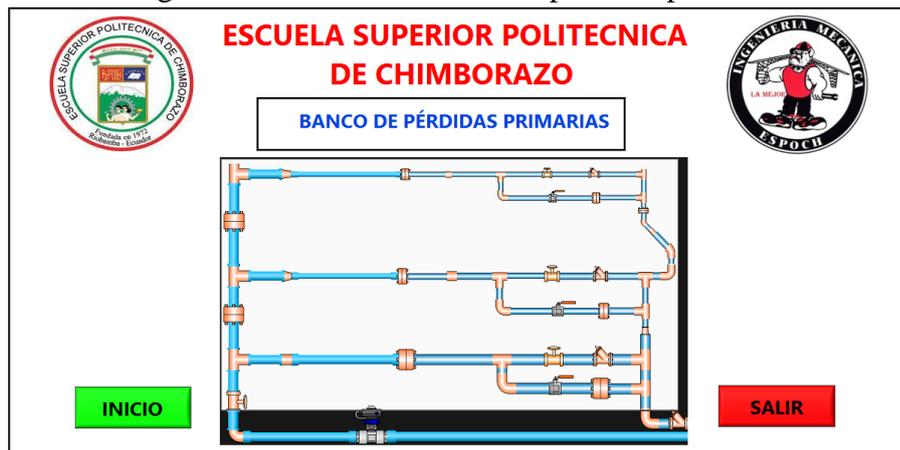
Fuente: Autor

El sistema del banco de tuberías está compuesto por tres ramales, el tipo de conexión es de forma en paralelo en tres ramales donde, difieren el diámetro en cada ramal.

El funcionamiento del banco permite hacer una circulación del fluido (agua) por diferentes ramales de manera independiente, debido a que el sistema posee válvulas de restricción de caudal, mediante su cierre y apertura.

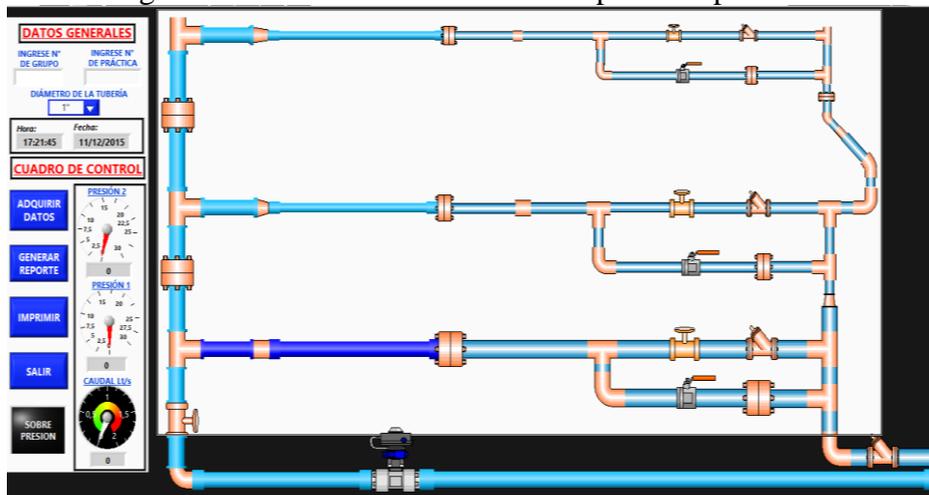
4.2.2 Fundamentos de la adquisición de datos. En esta sección se establecen los fundamentos de la adquisición de datos del banco de pérdidas automatizado para realizar las respectivas mediciones, cuantificar las pérdidas en accesorios y en el sistema de tuberías, mediante el uso de sensores de presión, flujómetro y el software programado bajo el entorno LabVIEW.

Figura 61. Interfaz del banco de pérdidas primarias



Fuente: Autor

Figura 62. Panel frontal del banco de pérdidas primarias



Fuente: Autor

4.2.2.1 *Procedimiento para la adquisición de datos en el banco de pérdidas.*

- Se procede a encender la bomba, teniendo en cuenta que el módulo de adquisición de datos se encuentre encendida.
- Para la toma de presiones del primer tramo de tubería, conectamos las mangueras en las válvulas correspondientes.
- Procedemos a abrir estas válvulas, para revisar si no existe burbujas dentro de la manguera si es así purgamos en cada una de las purgas que están ubicadas al lado del sensor de presión. .
- La válvula de compuerta principal se abre hasta la séptima vuelta, punto donde se empezara su análisis, la cual se ira cerrando cada 1 vuelta hasta llegar a su cierre completo.
- Abrir el programa respectivo para la toma de datos y enviar a ejecutar.
- Para la toma de datos se debe esperar unos 30 segundos hasta que la señal de los sensores se estabilicen.
- Se selecciona el diámetro de tubería que se va a analizar y después del tiempo de espera se da un click en el botón de adquisición de datos.
- Cuando se cierra por completo la válvula de compuerta principal, se da por terminada la práctica, en ese instante se da un click en generar reporte.
- Al generar el reporte, se habilita una tabla de datos en Excel, donde indica todos los datos obtenidos y las curvas características.
- Esta tabla de datos se envía a guardar o según la necesidad se envía a imprimir.
- Para continuar con la adquisición de datos del otro análisis de tubería se cambia el diámetro de tubería en el panel frontal del banco de pérdidas primarias, en la se tiene en cuenta el cambio de diámetro y se sigue los mismos pasos anteriores.

- Se apaga la bomba del banco.

4.3 Resultados de la generación de datos

Los resultados generados se adquieren mediante el banco de pérdidas automatizado que se indican en el ANEXO C de cada diámetro de tubería.

4.4 Perfiles de velocidades

En esta parte procedemos a realizar los cálculos analíticos de los perfiles de velocidad con los datos adquiridos en el banco de pérdidas para el estudio detallado del comportamiento del flujo de fluidos en las tuberías para el respectivo análisis del fenómeno físico, donde se estudia la naturaleza del perfil de velocidad y la manera de predecir está en cualquier punto, tanto para el flujo laminar y para el flujo turbulento. En este análisis se demuestra que la velocidad del flujo en una tubería circular varía de un punto a otro de la sección transversal. La velocidad junto a la pared del tubo es igual a cero, ya que el fluido está en contacto con la tubería estacionaria. Conforme se aleja de la pared, la velocidad se incrementa y alcanza un valor máximo en la línea central de la tubería.

4.4.1 Perfil de velocidades para flujo laminar. El flujo laminar se caracteriza por ser un movimiento perfectamente ordenado, suave, de las partículas del fluido, existiendo unas líneas de corriente y trayectorias bien definidas. Debido a la regularidad del perfil de velocidad en el flujo laminar, es posible definir una ecuación para la velocidad local en cualquier punto dentro de la trayectoria del flujo. (MOTT, 1996)

$$U = 2v \left[1 - \left[\frac{r}{r_0} \right]^2 \right] \quad (52)$$

Donde;

U = Velocidad local en un radio

r = radio

r = Radio máximo

v = Velocidad promedio

Para la resolución del perfil de velocidades en régimen laminar se procede a utilizar la ecuación anterior, donde se analiza el comportamiento del fluido en el banco de tuberías para el respectivo cálculo del perfil de velocidad en las tuberías.

Inicialmente el objetivo es calcular los perfiles de velocidad laminar, debido a un estudio rígido en el banco de tuberías en cada tramo de tubería no se logró encontrar un número de Reynolds menor a 4 000, debido a eso no se procede a simular el comportamiento del perfil de velocidad en ANSYS CFX.

4.5 Perfil de velocidades para flujo turbulento

En el régimen turbulento las partículas presentan un movimiento desordenado (caótico) sin que existan unas líneas de corriente ni trayectorias definidas caracterizadas por sus fluctuaciones turbulentas.

El perfil de velocidad para el flujo turbulento es muy diferente de la distribución parabólica del flujo laminar. La forma real del perfil de velocidad varía con el factor de fricción f , el que a su vez varía con el número de Reynolds y la rugosidad de la tubería. La ecuación que gobierna el fenómeno es. (MOTT, 1996)

$$U = v[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left[1 - \frac{r}{r_0}\right]] \quad (53)$$

Una forma alternativa de esta ecuación se desarrolla con la definición de la distancia a partir de la pared del tubo como $y = r_0 - r$. Entonces, el argumento del término logarítmico se convierte en

$$1 - \frac{r}{r_0} = \frac{r_0 - r}{r_0} = \frac{y}{r_0}$$

Entonces la ecuación es ahora.

$$U = v[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left[\frac{y}{r_0}\right]] \quad (54)$$

La velocidad máxima ocurre en el centro de la tubería ($y = r_0$) y su valor se calcula a partir de la ecuación (55) para un flujo turbulento.

$$U_{max} = v[1 + 1.43\sqrt{f}] \quad (55)$$

4.5.1 Cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ½ plg. Para realizar el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ½ plg, se procede a analizar el comportamiento del flujo de fluido a través de la tubería.

Para la simulación experimental en el banco de pruebas automatizado se controla el fluido con una válvula de compuerta, misma que modifica el comportamiento del fluido al interior de la tubería.

El comportamiento de fluido se realiza mediante las diferentes aperturas de la válvula, donde podemos observar en el registro de datos que se especifica en el Anexo C como varía la presión total a la entrada y salida de la tubería.

Con los datos de la Tabla 11 procedemos a encontrar el perfil de velocidades analíticamente reemplazando en la (ecuación 54).

Tabla 11. Datos del fluido para el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ½ plg

Apertura de cierre de la válvula	7	1
Diámetro interior	13,86 mm	13,86 mm
Velocidad promedio	6,04 m/s	5,47 m/s
Factor de fricción	0,0194	0,0198
Numero de Reynolds	73 518,11	66 598,76
Longitud	1 m	1 m

Fuente: Autor

Apertura de la válvula totalmente abierta. En la Tabla 11 se indica los valores de las velocidades que van formando el perfil en régimen turbulento debido a que se tiene un número de Reynolds de 73 518 en la tubería de ½ plg con una apertura totalmente abierta de la válvula de compuerta. En la figura 63 se observa el perfil de velocidad en régimen turbulento. El perfil en régimen turbulento alcanza una velocidad máxima en el centro de la tubería de 7,24 m/s, con una velocidad promedio de 6,04 m/s.

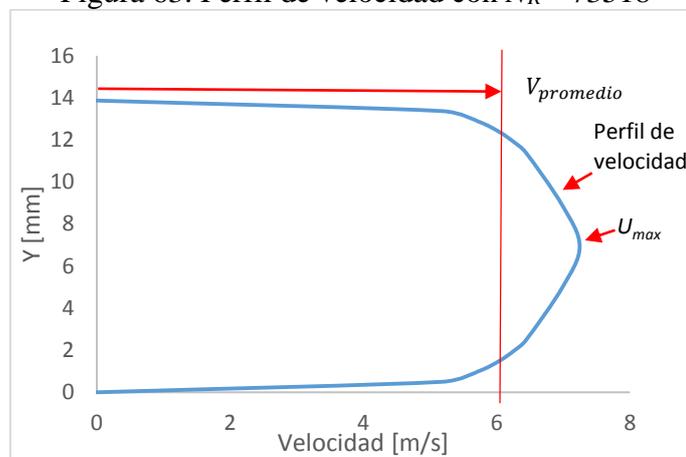
Apertura de cierre una vuelta. El siguiente perfil de velocidad que se va a calcular, con una apertura de la válvula de compuerta de una vuelta casi totalmente cerrado donde varía la velocidad promedio y el incremento del factor de fricción en la tubería.

Tabla 12. Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ½ plg en la 7 vuelta

U [m/s]	Y [mm]
0	0
5,18	0,50
5,72	1,0
6,04	1,50
6,27	2,00
6,44	2,50
6,99	5,00
7,24	6,93
6,99	8,86
6,44	11,36
6,27	11,86
6,04	12,36
5,72	12,86
5,18	13,36
0	13,86

Fuente: Autor

Figura 63. Perfil de velocidad con $N_R = 73518$



Fuente: Autor

La caída de presión tiene un valor de 1,92 psi (lb/plg²) con respecto a la toma de datos de presiones en el tramo de la tubería al inicio y final del punto de análisis para la simulación mediante la CFD (Computational Fluid Dynamics).

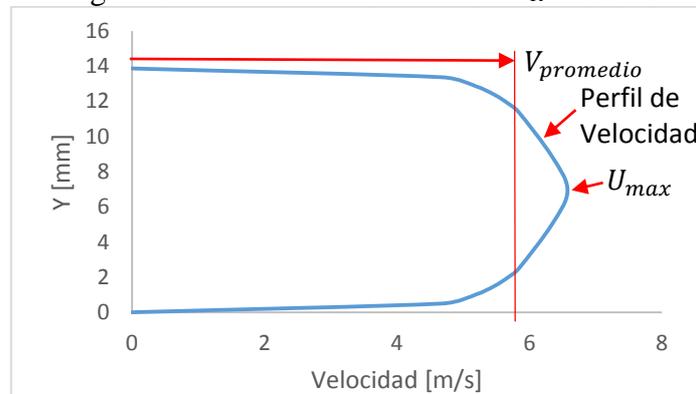
En la figura 64 se observa el perfil de velocidad en régimen turbulento estacionario. El perfil en régimen turbulento alcanza una velocidad máxima en el centro de la tubería de 6,57 m/s, con una velocidad promedio de 5,47 m/s.

Tabla 13. Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ½ plg en 1 vuelta.

U [m/s]	Y [mm]
0	0,00
4,68	0,50
5,18	1,00
5,47	1,50
5,68	2,00
5,84	2,50
6,34	5,00
6,57	6,93
6,34	8,86
5,84	11,36
5,68	11,86
5,47	12,36
5,18	12,86
4,68	13,36
0	13,86

Fuente: Autor

Figura 64. Perfil de velocidad con $N_R = 66518$



Fuente: Autor

4.5.2 *Cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ¾ plg.* El cálculo del perfil de velocidad en la tubería del tramo 2, procedemos igual hacer el análisis del comportamiento del fluido en el interior de la tubería con los datos en el Anexo C.

La variación de las presiones totales es mínima tanto a la entra y a la salida de la tubería durante la apertura de cierre de la válvula de compuerta. La pérdida de presión en el tramo de tubería es un valor considerable para un metro de longitud de tubería con un valor de 0,7 psi (lb/plg²) donde se determina el comportamiento del fluido.

Tabla 14. Datos del fluido para el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de ¾ plg

Apertura de cierre de la válvula	7	1
Diámetro interior	18,84 mm	18,84 mm
Velocidad promedio	3,38 m/s	3,23 m/s
Factor de fricción	0,0205	0,0207
Numero de Reynolds	56005,37	53459,67
Longitud	1 m	1 m

Fuente: Autor

4.5.2.1 *Apertura de la válvula totalmente abierta.* El análisis del fluido en el interior de la tubería se procede a graficar el perfil de velocidad con los datos de la tabla 14 adquiridos mediante el banco de perdidas automatizado en cada tramo de tubería con sus respectivas estrangulaciones de la válvula de compuerta.

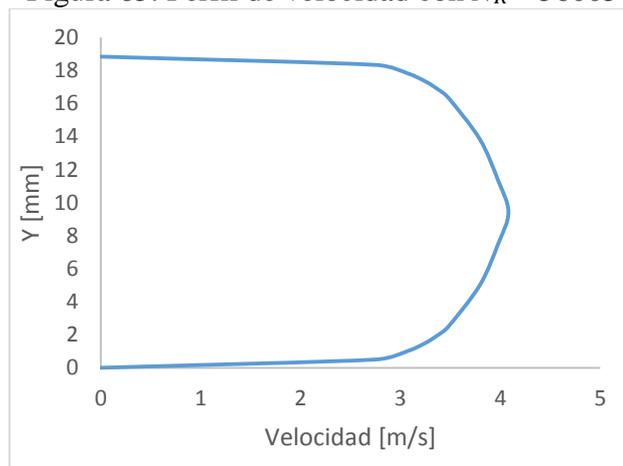
Tabla 15. Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de ¾ plg en la 7 vuelta

U [m/s]	Y [mm]
0	0
2,75	0,50
3,06	1,00
3,24	1,50
3,37	2,00
3,48	2,50
3,79	5,00
3,97	7,50
4,08	9,42
3,97	11,34
3,79	13,84
3,48	16,34
3,37	16,84
3,24	17,34
3,06	17,84
2,75	18,34
0	18,84

Fuente: Autor

En la figura 65 se observa el perfil de velocidad en régimen turbulento estacionario. El perfil en régimen turbulento alcanza una velocidad máxima en el centro de la tubería de 4,08 m/s, con una velocidad promedio de 3,38 m/s.

Figura 65. Perfil de velocidad con $N_R = 56005$



Fuente: Autor

4.5.2.2 Apertura de una vuelta en la válvula de compuerta.

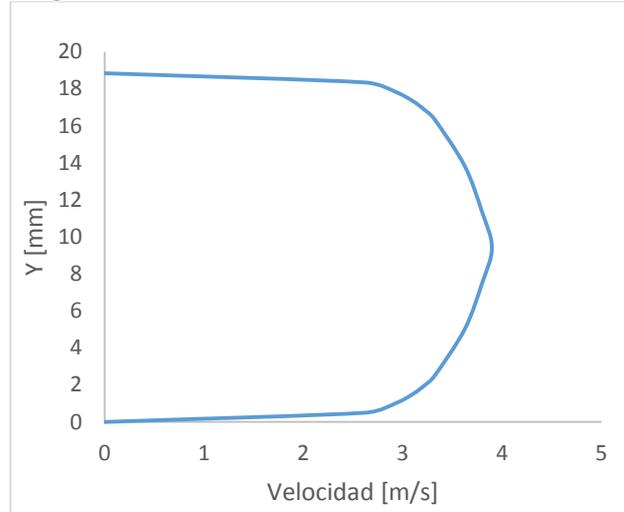
Tabla 16. Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de $\frac{3}{4}$ plg en 1 vuelta.

U [m/s]	Y [mm]
0	0
2,62	0,50
2,92	1,00
3,10	1,50
3,22	2,00
3,32	2,50
3,62	5,00
3,79	7,50
3,82	9,42
3,79	11,34
3,62	13,84
3,32	16,34
3,22	16,84
3,10	17,34
2,92	17,84
2,62	18,34
0	18,84

Fuente: Autor

En la figura 66 se observa el perfil de velocidad en régimen turbulento estacionario. El perfil en régimen turbulento alcanza una velocidad máxima en el centro de la tubería de 3,82 m/s, con una velocidad promedio de 3,23 m/s.

Figura 66. Perfil de velocidad con $N_R = 53459$



Fuente: Autor

4.5.3 Cálculo del perfil de velocidad en la tubería de 1 plg. En la tubería de una pulgada realizamos el cálculo del perfil de velocidad controlando la variación del fluido con una válvula de compuerta al inicio del banco de tuberías.

En el ANEXO C observamos los datos de como varia la presión con la variación en las diferentes aperturas de cierre de la válvula. En este tramo de tubería la pérdida de presión tiene un menor valor con respecto a los otros dos tramos. La pérdida de presión es de 0,57 psi [lb/plg²] en el metro de longitud de tubería.

Tabla 17. Datos del fluido para el cálculo del perfil de velocidad en la tubería de 1 plg

Apertura de cierre de la válvula	7	1
Diámetro interior	24,30 mm	24,30 mm
Velocidad promedio	2,08 m/s	1,96 m/s
Factor de fricción	0,0216	0,0218
Numero de Reynolds	44 410,18	41 942,94
Longitud	1 m	1 m

Fuente: Autor

4.5.3.1 Apertura de la válvula totalmente abierta.

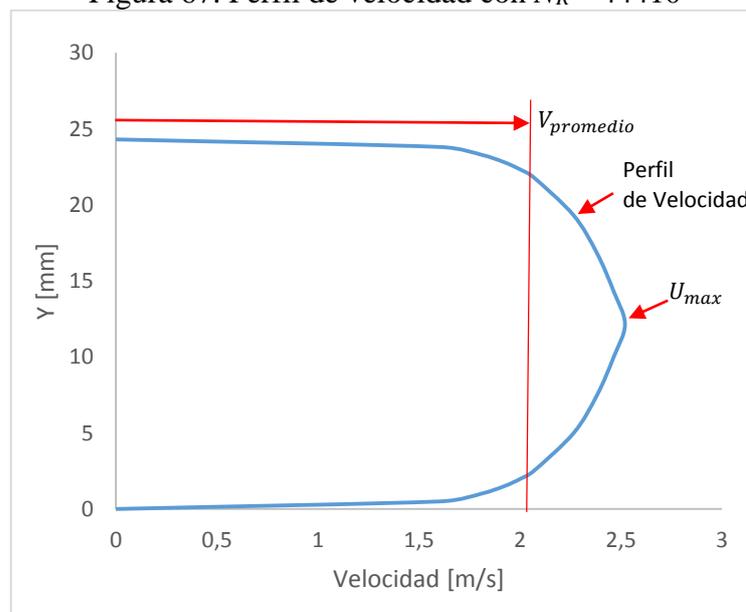
En la figura 67 se observa el perfil de velocidad en régimen turbulento. El perfil en régimen turbulento alcanza una velocidad máxima en el centro de la tubería de 2,52 m/s, con una velocidad promedio de 2,08 m/s.

Tabla 18. Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de 1 plg en la 7 vuelta

U [m/s]	Y [mm]
0	0
1,60	0,50
1,80	1,00
1,92	1,50
2,00	2,00
2,06	2,50
2,26	5,00
2,38	7,50
2,46	10,00
2,52	12,15
2,46	14,30
2,38	16,80
2,26	19,30
2,06	21,80
2,00	22,30
1,92	22,80
1,80	23,30
1,60	23,80
0	24,30

Fuente: Autor

Figura 67. Perfil de velocidad con $N_R = 44410$



Fuente: Autor

En la figura 67 se observa la distribución espacial de las velocidades locales.

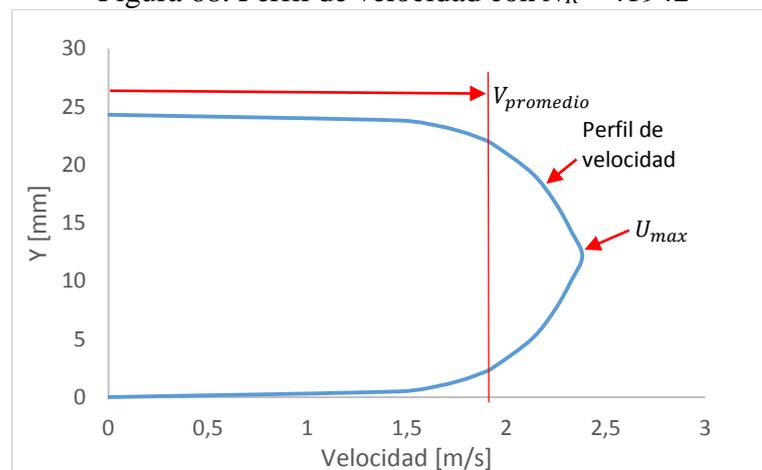
4.5.3.2 Apertura de la válvula con una vuelta.

Tabla 19. Velocidades vs Distancia a partir de la pared del tubo de 1 plg en la 1 vuelta

U [m/s]	Y [mm]
0	0
1,46	0,50
1,66	1,00
1,78	1,50
1,86	2,00
1,92	2,50
2,12	5,00
2,24	7,50
2,32	10,00
2,38	12,15
2,32	14,30
2,24	16,80
2,12	19,30
1,92	21,80
1,86	22,30
1,78	22,80
1,66	23,30
1,46	23,80
0	24,30

Fuente: Autor

Figura 68. Perfil de velocidad con $N_R = 41942$



Fuente: Autor

En la figura 68 se observa el perfil de velocidad en régimen turbulento.

El perfil en régimen turbulento alcanza una velocidad máxima en el centro de la tubería de 2,38 m/s, con una velocidad promedio de 1,96 m/s.

4.6 Resultados

En el análisis de resultados determinamos, que cada perfil de velocidad es diferente, porque cada perfil tiene su comportamiento del flujo al interior de la tubería como podemos observar los datos en la tabla 20.

Adquiridos durante la práctica de perdidas primarias en el banco de pruebas Automatizado.

Tabla 20. Análisis de resultado del cálculo del flujo turbulento en el banco de tuberías

Apertura de cierre de la válvula [vueltas]	Volumen [l]	Densidad [kg/m ³]	Viscosidad Dinámica [N.s/m ²]	Diámetro interno [mm]	Velocidad Promedio [m/s]	Numero de Reynolds	Flujo
7	10	1000	$1,58 \times 10^{-3}$	24,300	2,08	44 410,18	Turbulento
1	10	1000	$1,58 \times 10^{-3}$	24,300	1,96	41 942,94	Turbulento
7	10	1000	$1,58 \times 10^{-3}$	18,847	3,38	56 005,37	Turbulento
1	10	1000	$1,58 \times 10^{-3}$	18,847	3,23	53 479,67	Turbulento
7	10	1000	$1,58 \times 10^{-3}$	13,860	6,04	73 518,15	Turbulento
1	10	1000	$1,58 \times 10^{-3}$	13,860	5,47	66 528,76	Turbulento

Fuente: Autor

El número de Reynolds es adimensional, depende de la velocidad, densidad, diámetro y la viscosidad dinámica. En el análisis realizado en el banco de tuberías determinamos solo flujo turbulento en los tres tramos de tuberías.

Se define flujo turbulento al movimiento de un fluido, donde las partículas mueven desordenadamente. Este tipo de flujo se encuentra en el cálculo de prácticas de pérdidas primarias en el banco de pruebas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH.

4.6.1 Análisis del perfil de velocidad en tubería de 1 plg. En el cálculo analítico de los dos perfiles de velocidad observamos en la figura como varia las velocidades.

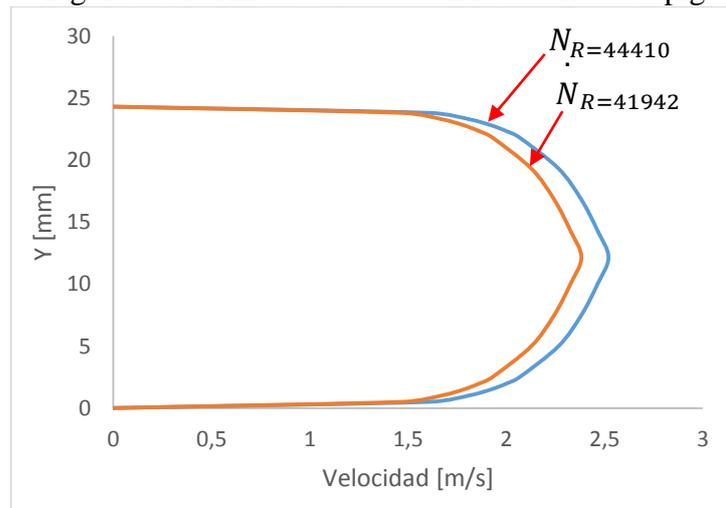
La forma del perfil de velocidad turbulento se forma a partir de la pared de la tubería con una velocidad igual a cero. La distribución de las velocidades en el interior de la tubería, varía alcanzado una velocidad máxima en centro de la tubería.

Tabla 21. Distribución de las velocidades en el interior de la tubería de 1 plg

U [m/s]	U [m/s]	Y [mm]
7	1	0
0	0	0
1,60	1,46	0,50
1,80	1,66	1,00
1,92	1,78	1,50
2,00	1,86	2,00
2,06	1,92	2,50
2,26	2,12	5,00
2,38	2,24	7,50
2,46	2,32	10,00
2,52	2,38	12,15
2,46	2,32	14,30
2,38	2,24	16,80
2,26	2,12	19,30
2,06	1,92	21,80
2,00	1,86	22,30
1,92	1,78	22,80
1,80	1,66	23,30
1,60	1,46	23,80
0	0	24,30

Fuente: Autor

Figura 69. Perfil de velocidad en la tubería de 1 plg



Fuente: Autor

El comportamiento del perfil de velocidad en el interior de la tubería varía con la estrangulación de la válvula de compuerta que controla el fluido.

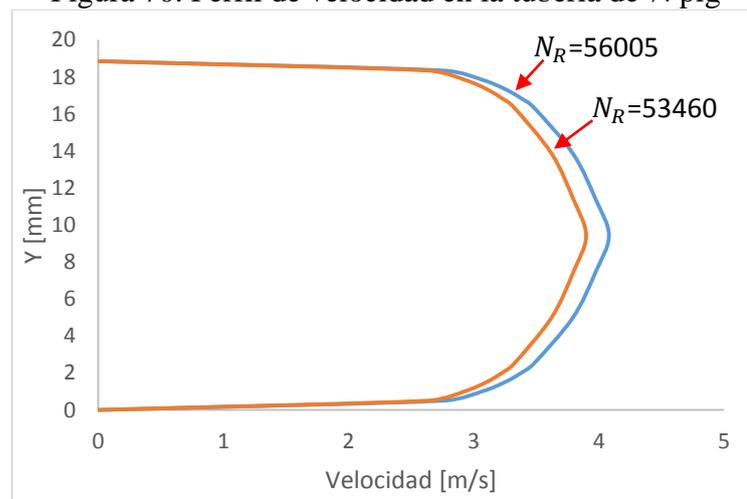
4.6.2 Análisis del perfil de velocidad en tubería de ¾ plg.

Tabla 22. Distribución de velocidades en el interior de la tubería de ¾ plg

U [m/s]	U [m/s]	Y [mm]
7	1	0
0	0	0
2,75	2,62	0,50
3,06	2,92	1,00
3,24	3,10	1,50
3,37	3,22	2,00
3,48	3,32	2,50
3,79	3,62	5,00
3,97	3,79	7,50
4,08	3,82	9,42
3,97	3,79	11,34
3,79	3,62	13,84
3,48	3,32	16,34
3,37	3,22	16,84
3,24	3,10	17,34
3,06	2,92	17,84
2,75	2,62	18,34
0	0	18,84

Fuente: Autor

Figura 70. Perfil de velocidad en la tubería de ¾ plg



Fuente: Autor

En la figura 70 se observa que el perfil de velocidad de flujo turbulento estacionario, donde se determina la distribución espacial de las velocidades locales en el área

transversal de la tubería desde la pared de la tubería con una velocidad igual cero hasta alcanzar una velocidad máxima en el eje central de tubería

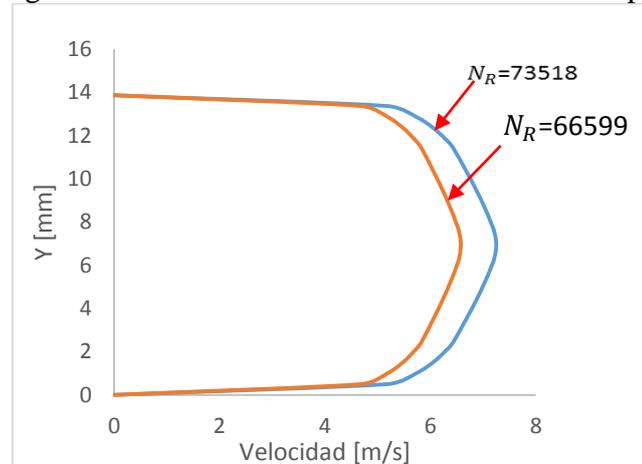
4.6.3 Análisis del perfil de velocidad en tubería de ½ plg.

Tabla 23. Distribución de velocidades en el interior de la tubería de ½ plg

U [m/s]	U [m/s]	Y [mm]
7,00	1,00	0
0	0	0
5,18	4,68	0,50
5,72	5,18	1,00
6,04	5,47	1,50
6,27	5,68	2,00
6,44	5,84	2,50
6,99	6,34	5,00
7,24	6,57	6,93
6,99	6,34	8,86
6,44	5,84	11,36
6,27	5,68	11,86
6,04	5,47	12,36
5,72	5,18	12,86
5,18	4,68	13,36
0	0	13,86

Fuente: Autor

Figura 71. Perfil de velocidad en la tubería de ½ plg



Fuente: Autor

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Análisis de resultados CFD.

En el análisis se indica los resultados obtenidos en la simulación CFD. Es importante detallar que para la simulación en el software ANSYS CFX ofrece un post-procesador llamado CFX Post, el cual está diseñado para la visualización gráfica o numérica de diferentes resultados que el usuario desee.

Al validar los resultados de los perfiles de velocidad se hace uso de la variable chart integrada en el programa, la cual arroja el resultado gráfico del perfil de velocidad. Para obtener este resultado directamente se realiza en el post procesador. Los resultados especificados en la tabla 24 son los valores de las velocidades máximas en el centro de la tubería para cada apertura de la válvula de compuerta que controla el fluido del agua al ingreso del banco de tuberías.

Para encontrar el perfil de velocidades se realiza un mallado no estructurado por el método tetraédrico que controla la tasa de crecimiento de los tamaños de los volúmenes de control que es específicamente para este tipo de flujo turbulento encontrado en el estudio realizado.

El mallado tetraédrico es parte del MESH-CFX específicamente para simular flujo turbulento convirtiéndose en el único método que no deforma el dominio.

Tabla 24. Resultados de las simulaciones en ANSYS CFX

Apertura [vueltas]	d_{int} [mm]	Tipo de mallado	Resultado ANSYS-CFX velocidad máxima [m/s]
7	24,30	Tetraédrico	2,63
1	24,30	Tetraédrico	2,37
7	18,84	Tetraédrico	3,87
1	18,84	Tetraédrico	3,49
7	13,86	Tetraédrico	7,65
1	13,86	Tetraédrico	6,42

Fuente: Autor

5.2 Análisis experimental

Para el análisis experimental los datos adquiridos son mediante el software LabVIEW en el banco de perdidas como se indica en el capítulo anterior, estos datos permiten validar la simulación CFD en el Software ANSYS-CFX.

En la Tabla 25 se observa la velocidad máxima en cada perfil formado en el interior de la tubería con su respectivo diámetro.

En el análisis experimental se define el cálculo del perfil turbulento con la velocidad promedio encontrada en cada apertura de cierre en las pruebas realizadas en el banco de perdidas, para realizar el cálculo de las distribuciones de las velocidades que forman el perfil de velocidad con un valor máximo en el centro de la tubería y con un valor de cero en la pared de la tubería. Se fundamentan en el principio del flujo turbulento especificado en el capítulo anterior en el ítem 4.5.

Tabla 25. Resultados experimentales

Apertura [vueltas]	d_{int} [mm]	Numero de Reynolds	Resultado experimental velocidad máxima [m/s]
7	24,30	44 410.18	2,52
1	24,30	41 942.94	2,38
7	18,84	56 005.37	4,08
1	18,84	53 479.67	3,82
7	13,86	73 518.15	7,24
1	13,86	66 528.76	6,57

Fuente: Autor

5.3 Validación de resultados

Para la validación de resultados se fundamentó en la forma del perfil de velocidad turbulento mediante el análisis de ANSYS-CFX y las prácticas experimentales realizadas en el banco de pérdidas.

En la tabla 26 se indican los valores de las velocidades máximas que forman el perfil de velocidad en el centro de las tuberías en cada apertura de la válvula de compuerta. Los resultados obtenidos de la simulación en el Software ANSYS-CFX, predicen de manera muy próxima el comportamiento real del fenómeno.

Para la estimación del porcentaje de error de las simulaciones en ANSYS-CFX se considera el aspecto más importante a predecir, es decir la velocidad máxima de los perfiles de velocidad.

En la tabla 26 se detallan los resultados y errores de la simulación en ANSYS-CFX, el porcentaje de error varía desde un valor de 0,42 % a 8,6 % en los valores de las velocidades máximas que forman los perfiles de velocidad.

Tabla 26. Análisis de resultados

Apertura [vueltas]	d_{int} [mm]	Resultado ANSYS-CFX velocidad máxima [m/s]	Resultado experimental velocidad máxima [m/s]	% Error
7	24,30	2,63	2,52	4,36
1	24,30	2,37	2,38	0,42
7	18,84	3,87	4,08	6,40
1	18,84	3,49	3,82	8,60
7	13,86	7,65	7,24	5,66
1	13,86	6,42	6,57	2,28

Fuente: Autor

El porcentaje de error más elevado en la simulación CFD es en el tramo de tubería de tres cuartos de pulgada con una diferencia de 0,33 m/s, de la velocidad máxima que forma el perfil de velocidad. En el eje central de la tubería en la apertura de cierre de una vuelta con la válvula de compuerta.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se cumplió el objetivo de la simulación del flujo incompresible estacionario en tuberías de PVC del banco de pérdidas del laboratorio de Turbomaquinaria mediante la CFD prediciendo una simulación real.

Con los resultados obtenidos en el análisis experimental y la simulación numérica CFD mediante el software ANSYS-CFX. Se concluye que el modelo CFD simula de una manera correcta a la realidad en el análisis de los perfiles de velocidad.

En la simulación CFD, analizamos solo flujo de régimen turbulento donde se determinan el comportamiento del fluido en diferentes capas en el interior de la tubería.

El mallado tetraédrico es el mejor elemento para simular flujo turbulento. Al validar los resultados del análisis de los perfiles de velocidad en pérdidas primarias en tuberías de PVC. Se determina que el máximo error obtenido es de 8.6% considerando un valor aceptable para simulación estacionario.

En el banco de pérdidas, concluimos que los instrumentos están calibrados debidamente para realizar las prácticas.

6.2 Recomendaciones

El software ANSYS-CFX en ingeniería de detalle, se recomienda como un simulador de alto grado de confiabilidad.

Para realizar un análisis del flujo en estado estacionario. Es recomendable obtener lecturas correctas de presiones en el banco de pérdidas automatizado para cada tramo de tubería, para una simulación real del fenómeno físico mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) aplicando el software ANSYS-CFX.

Es muy importante analizar el tipo de flujo que se está simulando para considerar el parámetro de la condición de frontera, a la entrada del dominio computacional en el pre-procesamiento.

El uso de un mallado no estructurado como método de discretización espacial en tuberías, permite una resolución más eficiente de las ecuaciones en los volúmenes de control. En el mallado del dominio computacional, se recomienda realizar un buen refinamiento de malla para obtener unos buenos resultados con menos porcentaje de error.

Se recomienda revisar la instrumentación eléctrica, específicamente los sensores de presión se deben calibrar dependiendo el ciclo de trabajo del banco de perdidas con la ayuda de un calibrador de manómetros.

BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS.INC. 2015.** ANSYS. [En línea] Diciembre de 2015. [Citado el: 10 de Diciembre de 2015.]
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>.
- BAKKER, Andre. 2012.** The Colorful Fluid Mixing Gallery. [En línea] 2012.
<http://www.bakker.org/>.
- CIMBALA, YUNUS A. CENGEL JOHN M. 2006.** *Mecanica de Fluidos* . Mexico : McGraw-Hill, 2006.
- FARIAS, Ernesto. 2015.** Monografias.com S.A. [En línea] 2015. [Citado el: 31 de Octubre de 2015.] <http://www.monografias.com/trabajos102/empleo-metodos-numericos-mejoramiento-rotores-turbinas-eolicas/image003.jpg>.
- JOHN D. ANDERSON JR. 1995.** *Computational Fluid Dynamics*. United States of America : McGraw-Hill, 1995.
- MOTT, ROBERT L. 1996.** *MECANICA DE FLUIDOS APLICADA*. Mexico : PEARSON, 1996.
- OMEGA Engineering. 2015.** OMEGA.com. [En línea] 2015.
<http://mx.omega.com/pptst/PX302.html>.
- PASOR, ANTONIO BARRERO RIPOLL- MIGUEL PEREZ- SABORID SANCHEZ-. 2005.** *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecanica de Fluidos*. España : McGraw-Hill, 2005.
- PODGORNIK, Rudolf. 2007.** Department of Theoretical Physics (F-1). [En línea] Marzo de 2007. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] <http://www-fl.ijs.si/~rudi/sola/Turbulence-models-in-CFD.pdf>.
- ROBERSON, CLAYTON T. CROWE DONALD F. ELGER JOHN A. 2002.** *Mecanica de Fluidos*. Mexico : CECSA, 2002.
- Temperature Instrumentation. 2015.** INSTRUMART. [En línea] 2015.
<https://www.instrumart.com/assets/ADT914-datasheet.pdf>.
- VOLLER, VAUGHAN R. 2009.** *Basic Control Volume Finite Element Methods for Fluids and Solids*. USA : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
- WHITE, FRANK M. 2012.** *MECANICA DE FLUIDOS* . Mexico : McGraw-Hill, 2012.
- WordPress. 2014.** Barba de Kutta. [En línea] 2014. [Citado el: 21 de Noviembre de 2015.] <https://porlasbarbasdekutta.files.wordpress.com/2013/01/captura-de-pantalla-2013-01-05-a-las-14-02-48.png>.

