



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ANÁLISIS DE FENÓMENOS EN EL FLUJO DE  
FLUIDOS EN LOS ACCESORIOS (TE, CODO,  
BIFURCADOR) EN LAS INSTALACIONES  
HIDRÁULICAS DE LAS CENTRALES  
HIDROELÉCTRICAS DE MEDIANA POTENCIA  
APLICANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONAL”**

**PALAGUACHI CALLE ROMEL JOSÉ**

## **TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

# **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2016**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DE LA TESIS DE GRADO**

---

2015-18-03

Yo recomiendo que la Tesis de Grado preparada por:

**PALAGUACHI CALLE ROMEL JOSÉ**

Titulado:

**“ANÁLISIS DE FENÓMENOS EN EL FLUJO DE FLUIDOS EN LOS  
ACCESORIOS (TE, CODO, BIFURCADOR) EN LAS INSTALACIONES  
HIDRÁULICAS DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE MEDIANA  
POTENCIA APLICANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONAL”**

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

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Jorge Lema  
**DIRECTOR**

---

Ing. Miguel Aquino Arroba  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## EXAMINACIÓN DE LA TESIS DE GRADO

---

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: PALAGUACHI CALLE ROMEL JOSÉ

TESIS DE GRADO: “ANÁLISIS DE FENÓMENOS EN EL FLUJO DE FLUIDOS EN LOS ACCESORIOS (TE, CODO, BIFURCADOR) EN LAS INSTALACIONES HIDRÁULICAS DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE MEDIANA POTENCIA APLICANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL”

Fecha de Examinación: 2016-12-14

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo A. <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Jorge Lema <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Miguel Aquino <b>ASESOR</b>			

\* 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. Geovanny Novillo A.  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

La Tesis de Grado que presento, es original y basada 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.

---

**Palaguachi Calle Romel José**

## **DECLARACION DE AUTENTICIDAD**

Yo, Romel José Palaguachi Calle, declaro que la presente Tesis de Grado es de mi autoría y que los resultados de la misma 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 esta Tesis de Grado.

---

**Palaguachi Calle Romel José**  
030239111-5

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación es dedicado a mi familia, a mis padres José y Laura agradeciéndoles por la visión que tienen de ayudarme a preparar en una profesión, la paciencia, confianza y sus excelentes ejemplos que me han forjado para mi bienestar. También les dedico este trabajo a mis hermanos que de igual manera han sido el apoyo y pilares de ejemplo para mi persona. Y finalmente a mis catedráticos que siempre me han forjado en una preparación con el conocimiento y valores profesionales.

**Romel José Palaguachi Calle.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios que ha sido paciente conmigo y misericordioso. A mi familia que siempre me ha apoyado.

**Romel José Palaguachi Calle.**

# CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.2.1 Justificación Técnica.....	2
1.2.2 Justificación Económica. ....	3
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos: .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1 Instalaciones hidráulicas .....	4
2.2 Variables hidráulicas.....	4
2.2.1 Numero de Reynolds.....	4
2.2.2 Flujo turbulento en tuberías. ....	5
2.2.3 Escala de Turbulencia de flujo en una tubería. ....	6
2.2.4 Tensión de Reynolds. ....	6
2.2.5 Presión Dinámica (Pd). ....	8
2.2.6 Presión Estática (Ps).....	8
2.2.7 Presión Total (P <sub>0</sub> ).....	9
2.2.8 Golpe de ariete.. ....	10
2.2.9 Pérdidas.....	10
<b>3. SÍNTESIS DEL DISEÑO DE UNA TUBERÍA DE PRESIÓN Y ACCESORIOS.</b> .....	14
3.1 Cálculo del diámetro .....	14
3.1.1 Relación empírica de Warnick (1984).. ....	14
3.1.2 Relación empírica entre la presión y la altura.....	14
3.1.3 Relaciones empíricas entre el caudal y la altura. ....	15
3.2 Espesor.....	15
3.3 Cargas.....	16
3.3.1 Cargas Vivas. ....	17
3.3.2 Cargas excepcionales. ....	17
3.4 Coeficiente de seguridad .....	18
3.4.1 Tensión admisible. ....	18
3.4.2 Materiales de construcción para los accesorios.. ....	19
3.5 Métodos para dimensionar los accesorios.....	20
3.5.1 Te.. ....	20
3.5.2 Codo.....	21
3.5.3 Bifurcador. ....	22
3.6 Central hidroeléctrica .....	24
3.6.1 Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas.:.....	24
3.6.2 Funcionamiento.....	24
3.7 Principios de la Dinámica de fluidos computacional.....	25
3.7.1 Usos.....	25
3.7.2 Fundamento matemático del CFD. ....	26

3.8	Software CFD .....	39
3.8.1	Flow simulation. ....	39
3.8.2	Ansys Fluent .....	39
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS EN EL FLUJO DE FLUIDOS</b>	
	<b>APLICANDO CFD .....</b>	<b>40</b>
4.1	Introducción. ....	40
4.2	Mallado. ....	41
4.2.1	Mallado en solidworks y calidad. ....	41
4.2.2	Mallado en Ansys y calidad. ....	42
4.3	Programación de campos para la solución. ....	44
4.3.1	Propiedades del fluido. ....	44
4.3.2	Condiciones de frontera. ....	46
4.3.3	Programación de los residuos. ....	50
4.4	Resultados estacionarios del Análisis CFD. ....	53
4.4.1	Resultados de la te en SolidWorks Flow Simulation. ....	53
4.4.2	Resultados de la te en Ansys Fluent. ....	56
4.4.3	Resultados del bifurcador en SolidWorks Flow Simulation. ....	57
4.4.4	Resultados del bifurcador en Ansys Fluent. ....	60
4.4.5	Resultados del codo en SolidWorks Flow Simulation. ....	62
4.4.6	Resultados del codo en Ansys Fluent. ....	64
4.5	Resultados transitorios del Análisis CFD. ....	65
4.5.1	Resultados de la te en estado transitorio. ....	65
4.5.2	Resultados del bifurcador en estado transitorio. ....	68
4.5.3	Resultados del codo en estado transitorio. ....	70
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
5.1	Conclusiones. ....	73
5.2	Recomendaciones. ....	74

## LISTA DE TABLAS

		<b>Pág.</b>
1	Relaciones de la sobrepresión. ....	10
2	Combinación de las cargas de trabajo. ....	16
3	Factores de tensiones. ....	17
4	Coefficiente de seguridad. ....	18
5	Tensiones admisibles. ....	19
6	Límite elástico en función del golpe de ariete. ....	19
7	Selección de materiales en función de la presión de trabajo. ....	19
8	Dimensiones para el bifurcador. ....	23
9	Subíndices para la localización de los vectores. ....	38

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Estructura de un codo construido por desarrollo. ....	2
2	Transporte de moléculas laminar y turbulento. ....	5
3	Curva de la velocidad en flujo turbulento. ....	5
4	Distribución media de la velocidad y remolinos turbulentos. ....	7
5	Componentes de las tensiones en las 3 caras de un elemento de un fluido. ....	7
6.	Diagrama de las presiones internas y externas que ejercen en la tubería. ....	9
7	Valores del factor $K_L$ para distintos accesorios. ....	13
8	Relación de dimensiones de la te. ....	20
9	Relación de dimensiones para el codo. ....	22
10	Relación de dimensiones para el bifurcador. ....	23
11	Relación de dimensiones para el bifurcador. ....	23
13	Malla en 2D. ....	27
14	Triángulos donde se almacena la información. ....	31
15.	Triángulos donde se almacena la información. ....	32
16.	Volumen de control para una dimensión. ....	33
17.	Volumen de control para Dos dimensiones. ....	35
18.	Volumen de control para Tres dimensiones. ....	35
19.	Una malla cartesiana de 2D. ....	36
20.	Moléculas computacionales. ....	37
21.	Calidad de malla para el codo. ....	41
22.	Calidad de malla para el Bifurcador. ....	42
23.	Calidad de malla para en la Te. ....	42
24.	Calidad de malla para el Bifurcador. ....	43
25.	Calidad de malla para el codo. ....	43
26.	Calidad de malla para la T ....	44
27.	Densidad en solidworks flow simulation. ....	44
28.	Viscosidad dinámica en solidworks flow simulation. ....	45
29.	Condición de la pared en solidworks flow simulation. ....	45
30.	Parámetros termodinámicos en solidworks flow simulation. ....	45
31.	Propiedades del agua en Ansys Fluent. ....	46
32.	Condición de frontera para la entrada de fluido. ....	47
33.	Condición de frontera para la salida de fluido. ....	48
34.	Condiciones de frontera para el bifurcador. ....	48
35.	Condiciones de frontera para el bifurcador. ....	48
36.	Condiciones de frontera de entrada para la Te. ....	49
37.	Condiciones de frontera para la salida de flujo en la Te. ....	49
38.	Condiciones de frontera para la salida a la chimenea de flujo en la Te. ....	50
39.	Áreas donde se recolecta los valores calculados en la pared del codo. ....	50
40.	Área donde se recolecta los valores calculados en la entrada de fluido en el codo. ....	51
41.	Área donde se recolecta los valores calculados en la salida de fluido en el codo. ....	51
42.	Residuos en la pared. ....	52
43.	Residuos en la pared. ....	52
44.	Residuos de tensiones de Reynolds en la entrada del flujo. ....	53

45.	Contornos de velocidades. ....	53
46.	Contornos de presiones. ....	54
47.	Ploteo de datos de la variación de la velocidad. ....	54
50.	Ploteo de datos de la variación de la presión l. ....	55
51.	Comprobación de convergencia de los caudales. ....	55
52.	Comprobación de convergencia de la velocidad en la entrada como la salida. 56	56
53.	Comprobación de convergencia de los valores de esfuerzos en la pared. ....	56
54.	Contornos de la presión en la pared. ....	56
55.	Tensiones de flujo. ....	57
56.	Contornos de velocidades. ....	57
57.	Contornos de presiones. ....	58
58.	Perfil de velocidad en la entrada, salida grande y la salida pequeña ....	58
59.	Perfil de presiones en la entrada. ....	59
60.	Comprobación de convergencia de los caudales. ....	59
61.	Comprobación de convergencia de la velocidad de entrada SGAvVelocity 1. ....	60
62.	Comprobación de convergencia de la presión dinámica. ....	60
63.	Comprobación de convergencia de los valores de esfuerzos en la pared. ....	60
64.	Contornos de presión. ....	61
65.	Valores de la energía cinética. ....	61
66.	Contornos de velocidad. ....	62
67.	Perfil de velocidad en la entrada, mitad y salida del codo ....	62
68.	Perfil de presiones en la entrada y salida del codo ....	63
69.	Comprobación de convergencia de los valores de los caudales. ....	63
70.	Comprobación de convergencia de la velocidad de entrada y salida. ....	63
71.	Comprobación de convergencia de la presión dinámica. ....	64
72.	Contornos de presión. ....	64
73.	Tensiones de flujo. ....	65
74.	Programación de la condición de frontera en la entrada. ....	65
75.	Programación de la condición de frontera en la salida. ....	66
76.	Programación de la condición de frontera en la salida de la chimenea. ....	66
77.	Variación de la presión en la pared de la te. ....	67
78.	Contornos de la presión a los 5 segundos. ....	67
79.	Contornos de la presión a los 120 segundos. ....	68
80.	Programación de la condición de frontera en la entrada. ....	68
81.	Programación de la condición de frontera en la salida grande. ....	68
82.	Programación de la condición de frontera en la salida pequeña. ....	69
83.	Variación de la presión en la pared en el bifurcador. ....	69
84.	Contornos de la presión a los 5 segundos. ....	70
85.	Contornos de la presión a los 100 segundos. ....	70
86.	Programación de la condición de frontera en la entrada. ....	70
87.	Programación de la condición de frontera en la salida pequeña. ....	71
88.	Variación de la presión en la pared en el codo. ....	71
89.	Presión en la pared en el codo en flujo estable. ....	71
90.	Contornos de la presión a los 5 segundos. ....	72
91.	Contornos de la presión a los 100 segundos. ....	72

## SIMBOLOGÍA

$v$	velocidad	m/s
$u(t)$	velocidad instantánea	m/s
$U$	velocidad media	m/s
$u'(t)$	componente de fluctuación	m/s
$D$	diámetro interno de la tubería	m
$\rho$	densidad del fluido	Kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\mu$	viscosidad dinámica	kg.m/s
$\tau_{xx}$	esfuerzo normal en la dirección x	MPa
$\tau_{yy}$	esfuerzo normal en la dirección y	MPa
$\tau_{zz}$	esfuerzo normal en la dirección z	MPa
$u$	velocidad en la dirección x	m/s
$v$	velocidad en la dirección y	m/s
$w$	velocidad en el dirección z	m/s
$\tau_{xy}$	esfuerzo cortante en la dirección xy o yx	MPa
$\tau_{xz}$	esfuerzo cortante en la dirección xz o zx	MPa
$\tau_{yz}$	esfuerzo cortante en la dirección yz o zy	MPa
$P_d$	presión dinámica en	MPa
$P$	presión estática	MPa
$F$	fuerza ejercida la pared	N
$A$	área del accesorio	m <sup>2</sup>
$P_0$	presión total	MPa
$h_f$	pérdida de fricción	
$Q$	caudal	m <sup>3</sup> /s
$L$	longitud de la tubería	m
$\Delta h$	pérdida hidráulica	
$n$	número de Manning	
$R_h$	radio hidráulico	m
$P$	capacidad instalada	MW
$H_r$	punto de altura	m
$T$	tiempo	s

## LISTA DE ABREVIACIONES

CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
CAD	Dibujo Asistido por Computadora
USBR	United States Bureau Reclamation
DETEC	Departement federal de Environnement, des transports, of communication

## LISTA DE ANEXOS

- A Albañque para el cálculo de las sobrepresiones
- B Circuito Hidraulico de las Hidroelectricas

## RESUMEN

Los fenómenos en el flujo de fluidos en las tuberías dependen del tipo de fluido en movimiento; tienden a crear magnitudes físicas como la velocidad, presión, esfuerzo entre otras, su estudio se realiza desde una perspectiva matemática aplicada a las leyes de movimiento como la conservación de la masa, la segunda ley de Newton y la conservación de la energía. Se han creado paquetes informáticos tales como Solidworks FlowSimulation, Ansys Fluent, entre otros que nos permiten resolver estas ecuaciones; para realizar este tipo estudio se debe seguir tres pasos que son el pre-proceso, proceso y el pos-proceso. En la presente tesis se ejecutó un estudio hidráulico en los accesorios tee, codo y bifurcador utilizando los dos software nombrados anteriormente; el pre-proceso se refiere al desarrollo del CAD, creación de la geometría, método de mallado, condiciones de frontera y programación de los residuos de cada accesorio. El proceso se refiere a la ejecución del programa, y el pos-proceso se refiere al muestreo de los resultados; estos métodos se denominan dinámica de fluidos computacional (CFD). El estudio en general abarca dos enfoques de solución: en estado estable y estado transitorio (que provoca el golpe de ariete). Como resultados se obtuvieron valores de la velocidad, flujo másico, flujo volumétrico, tensiones de Reynolds, presión dinámica y la presión estática que no debe sobrepasar el valor de 5,31 MPa en condiciones de operación normal para todos los accesorios. Se concluyó que entre más pequeño es el volumen de control (VC) los resultados son más confiables, requiriéndose volúmenes menores al aproximarse a la superficie del accesorio. Se recomienda tener un conocimiento sobre estos fenómenos desde el punto de vista matemático y adquirir computadoras con hardware de alto rendimiento.

**PALABRAS CLAVE:** <DIBUJO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)>, <DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)>, <VOLUMEN DE CONTROL (VC)>, <GOLPE DE ARIETE>, <CENTRAL HIDROELÉCTRICA>, <ACCESORIOS (TEE, CODO, BIFURCADOR)>, <MALLADO (MÉTODO QUE DIVIDE AL DOMINIO COMPUTACIONAL)>, <DOMINIO COMPUTACIONAL>

## ABSTRACT

The phenomena in the flow of fluids in pipes depend on the type of flow in motion; they tend to create magnitudes such as speed, pressure, effort, among others; its study is carried out from a mathematical perspective applied to the laws of motion as the conservation of mass, Newton's second law and conservation of energy. Computer packages such as SolidWorks, Flow simulation, Ansys Fluent, have been created to solve these equations; to carry out this type of study three steps must be followed: pre-processing, processing and post-processing. In the present thesis, a hydraulic study was carried out on the tee, elbow and split accessories using the two named software; The pre-process refers to the development of the CAD, creation of the geometry, meshing method, boundary conditions and programming of the residuals of each accessory. The process refers to the execution of the program, and the post-process refers to the sampling of the results; These methods are called computational fluid dynamics (CFD). The study generally encompasses two approaches to solution: stable and transitory (which causes water hammer). The results obtained were values of velocity, mass flow, volumetric flow, Reynolds voltages, dynamic pressure and static pressure, which should not exceed the value of 5,31 Megapascals (MPa) under normal operating conditions for all accessories. It was concluded that the smaller volumes when approaching the surface of the accessory. It is recommended to have knowledge about these phenomena from the mathematical point of view and to acquire computers with high performance hardware.

KEYWORDS: <COMPUTER AIDED DRAWING (CAD)>, <COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)>, <CONTROL VOLUME (VC)>, <HYDROELECTRIC POWER>, <BRANCH OUTLET>, <MESHER (METHOD THAT DIVIDES THE COMPUTATIONAL DOMAIN)>, <COMPUTATIONAL DOMAIN>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La energía eléctrica se ha consolidado como un eje necesario, principal para el desarrollo y comodidad de la humanidad. Uno de los principales métodos para generar electricidad son las centrales hidroeléctricas. Estas centrales funcionan al embalsar grandes cantidades de agua para hacerlas circular en tuberías que tienen grandes saltos hidráulicos, para finalmente mover las turbinas que están unidas a los generadores eléctricos.

En la actualidad para diseñar y verificar el funcionamiento de estos sistemas hidráulicos, previo a su construcción se los analiza con diferentes paquetes computacionales. Este método de análisis se denomina Dinámica de Fluidos Computacional o CFD por sus siglas en inglés.

En trabajos anteriores se ha analizado una válvula en una pequeña planta hidroeléctrica utilizando CFD. Se ha llegado a la conclusión de que las simulaciones numéricas se constituyen en una gran herramienta para el diseño y optimización del rendimiento de una hidroeléctrica y el comportamiento del flujo a través de estructuras hidráulicas y accesorios. Las pruebas experimentales no siempre son viables debido a que son de alto costo y es mucho más difícil analizar diferentes escenarios y fronteras (Pereira, y otros, 2010).

Se abordó además, otro estudio como trabajo de grado en la ESPOL que investiga la validación CFD del golpe de ariete en conductos cerrados, debido a que este fenómeno se produce al momento de cerrar una válvula provocando un bloqueo de flujo y una sobre presión (CASTILLO OROZCO, 2012). El presente trabajo se plantea el análisis hidráulico en los accesorios de una central hidroeléctrica posterior a una tesis de grado, que se refiere a la estandarización del cálculo estructural para tuberías de presión para centrales hidroeléctricas, en el cual se recomienda realizarlo (Cedeño Morales, 2014).

## 1.2 Justificación

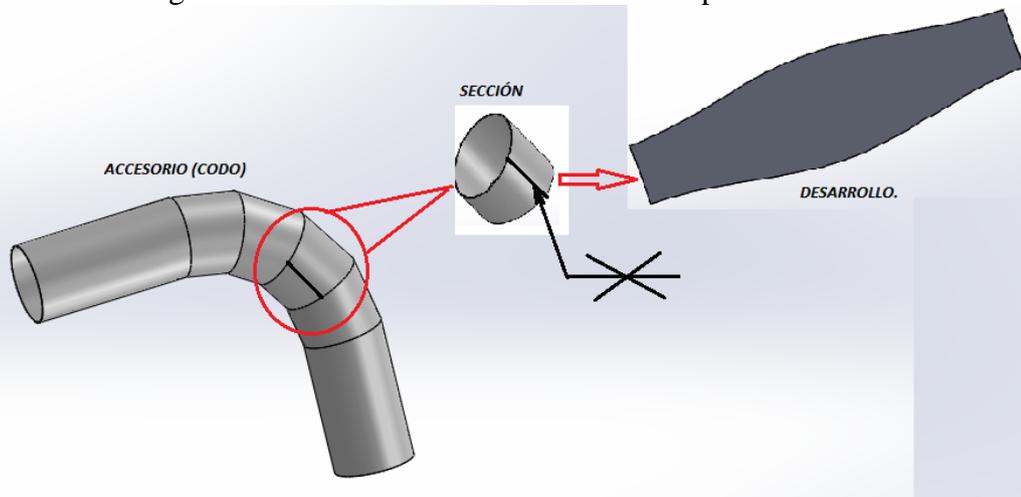
**1.2.1 Justificación Técnica.** Las centrales hidroeléctricas están conformadas por un sistema hidráulico, constituido por tuberías y accesorios tales como: codos, bifurcadores, tes, entre otros. Para la construcción de los accesorios es necesario realizar el cálculo estructural, geométrico y el estudio del análisis hidráulico.

La dinámica de fluidos computacional (CFD Computational fluid dynamics), es la técnica de solución numérica que se cimienta en las ecuaciones Navier-Stokes, en forma de métodos numéricos como elementos finitos.

El CFD es una herramienta necesaria para el análisis de problemas de flujo de fluidos, en este caso permitirá verificar la eficiencia hidráulica de un accesorio sin necesidad de construirlo físicamente hasta conseguir un diseño apropiado para las condiciones de trabajo. Este proceso permite determinar las dimensiones del accesorio, contrastar los resultados cuando se analizan los puntos críticos y validar el diseño para determinar si se cumple la hipótesis planteada en el modelo numérico del flujo en función del fenómeno físico que se estudia.

Debido a su gran tamaño, la construcción de los accesorios y las tuberías de presión para las centrales hidroeléctricas, se realiza por el método denominado “desarrollo”, que consiste en cortar planchas de acero para luego doblarlas y finalmente unir las mediante soldadura.

Figura 1. Estructura de un codo construido por desarrollo.



Fuente: Autor

Estos elementos están sometidos a presiones y velocidades (de los fluidos que circulan por ellos) muy elevadas, por lo tanto en la presente tesis de grado se tiene como propósito identificar zonas de distorsión de las trayectorias del fluido y tensiones. Es necesario conocer las causas de estas distorsiones ya que son perjudiciales para el normal funcionamiento del sistema.

**1.2.2** *Justificación Económica.* Mediante el estudio CFD en un accesorio, se determina el comportamiento del flujo; en caso de que no se satisfaga el diseño, se pueden realizar cambios en las dimensiones y parámetros físicos del accesorio hasta encontrar el diseño óptimo, esto permitirá ahorrar tiempo y recursos económicos en la construcción de los prototipos de pruebas y accesorios.

### **1.3** **Objetivos**

**1.3.1** *Objetivo general.* Analizar el fenómeno de flujo de fluidos en los accesorios (bifurcador, te, codo) de una central hidroeléctrica, aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD).

**1.3.2** *Objetivos específicos:*

- Determinar los parámetros del diseño mecánico e hidráulico para la construcción de los accesorios (te, codo y bifurcador), para el desarrollo de su geometría.
- Estudiar los fenómenos del flujo de fluidos que atraviesan a los accesorios.
- Analizar el fenómeno del golpe de ariete cuando se detiene el flujo.
- Ilustrar los pasos para el desarrollo del CFD.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Instalaciones hidráulicas

En las instalaciones hidráulicas se producen fenómenos de transporte en el flujo de agua que son de tipo transitorio, donde, las propiedades del fluido tales como la velocidad y presión no son constantes en el tiempo. Esto produce los flujos turbulentos; para determinar el valor de estas variables hidráulicas se consideran estables en un periodo corto de tiempo en una posición determinada. Los valores de estas propiedades dependen de la trayectoria del fluido, por lo tanto es necesario analizar su variación para asegurar que los accesorios soporten los cambios de velocidad, golpe de ariete, vibraciones, presiones, esfuerzos, etc. Para el flujo de agua es recomendable utilizar ductos circulares; resisten diferencias de presión muy altas (García Valdeolivas, 2013).

#### 2.2 Variables hidráulicas.

**2.2.1** *Numero de Reynolds.* La transformación de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del fluido y el tipo de fluido, entre otras causas. El régimen de flujo depende principalmente de las fuerzas inerciales y de las fuerzas viscosas en el fluido. Esta relación se denomina número de Reynolds y, para el flujo interno en una tubería se expresa como se muestra en la ecuación 1 (CENGEL, y otros, 2006, p. 335):

$$Re = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{fuerza viscosa}} = \frac{V_{prom} * D}{\nu} = \frac{\rho V_{prom} * D}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

$v_{prom}$  = velocidad promedio del fluido, en m/s

$D$  = diámetro interno de la tubería, en m

$\rho$  = densidad del fluido en kg/m<sup>3</sup>

$\nu$  = viscosidad cinemática, en m<sup>2</sup>/s

$\mu$  = viscosidad dinámica, en kg.m/s

Los límites del número de Reynolds sirven para identificar los estados de flujo laminar y turbulento, tal como se muestra a continuación.

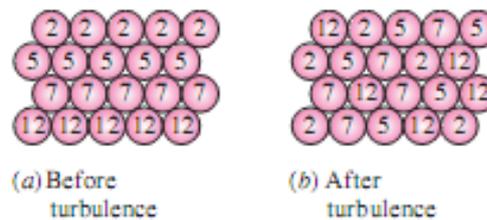
$Re \leq 2300$  es flujo laminar

$2300 \leq Re \leq 4000$  es flujo transicional

$Re \geq 4000$  es flujo turbulento

**2.2.2 Flujo turbulento en tuberías.** Este fenómeno se caracteriza porque en el recorrido del fluido, se presentan fluctuaciones aleatorias y regiones giratorias llamadas remolinos. La intensa mezcla del flujo turbulento lleva a que las partículas del fluido tengan diferentes posiciones y cantidades de movimiento. (CENGEL, y otros, 2006, p. 335)

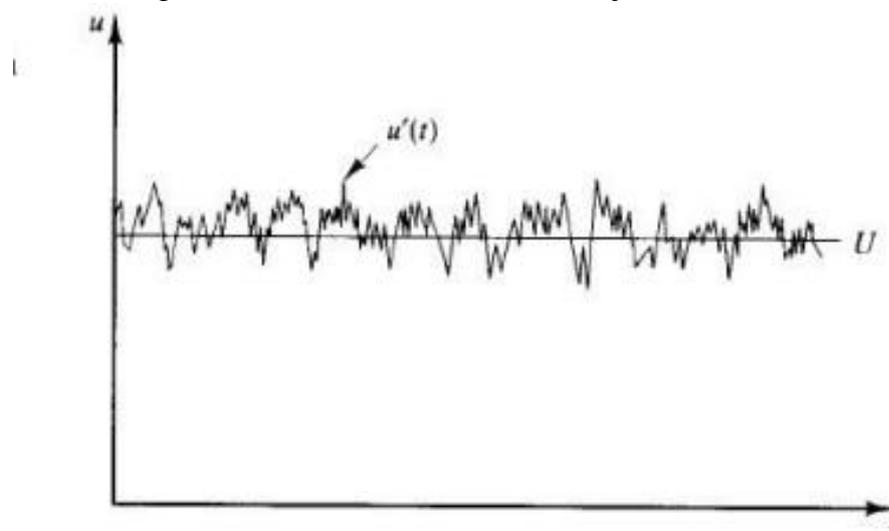
Figura 2. Transporte de moléculas laminar y turbulento.



Fuente: (CENGEL, y otros, 2006) figura 8-20 página 335

En la figura 3, se muestra la velocidad expresada como la suma de un valor promedio  $\bar{u}$  y una componente fluctuante  $u'$ :

Figura 3. Curva de la velocidad en flujo turbulento.



Fuente: (Sezai, 2014) capítulo 3 página 4.

La relación de la velocidad en el flujo turbulento en función del tiempo es:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (2)$$

Donde:

$u(t)$  = velocidad instantánea, en m/s

$U$  = velocidad media, en m/s

$u'(t)$  = componente de fluctuación, en m/s

**2.2.3** *Escala de Turbulencia de flujo en una tubería.* Es una relación entre fuerzas provocadas por las propiedades físicas del fluido como la propiedad de la viscosidad y propiedad de transporte como es la velocidad. Para un flujo en conductos cerrados, el número de Reynolds se define como (Sezai, 2014):

$$Re = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{fuerza viscosa}} = \frac{U*Y}{\nu} \quad (3)$$

Donde:

$Y$  = distancia hacia la pared, en m.

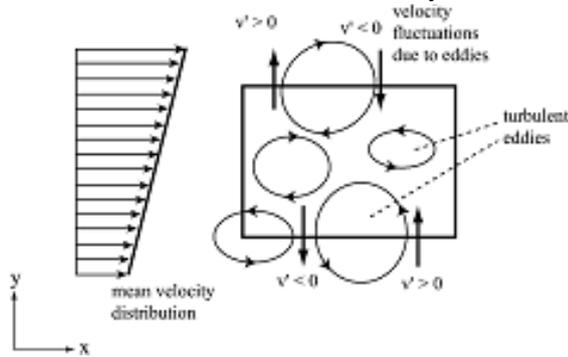
- Cerca de la pared Reynolds es pequeño; dominan las fuerzas viscosas.
- Lejos de la pared Reynolds es grande; dominan las fuerzas inerciales.

Cerca de la pared  $U$  depende de  $y, \rho, \mu$  y  $\tau_w$  (tensión de corte en la pared) por lo tanto la velocidad está en función de  $U = f(y, \rho, \mu, \tau_w)$  (Sezai, 2014).

**2.2.4** *Tensión de Reynolds.* También conocida como tensión aparente, En dinámica de fluidos, la tensión de Reynolds es el componente de la tensor total de estrés en un fluido obtenido a partir de la operación de promediado en los Navier-Stokes ecuaciones

Para dar cuenta de turbulentas fluctuaciones en el líquido impulso, es el esfuerzo adicional que produce una aceleración, provocando que el fluido cree remolinos (Sezai, 2014).

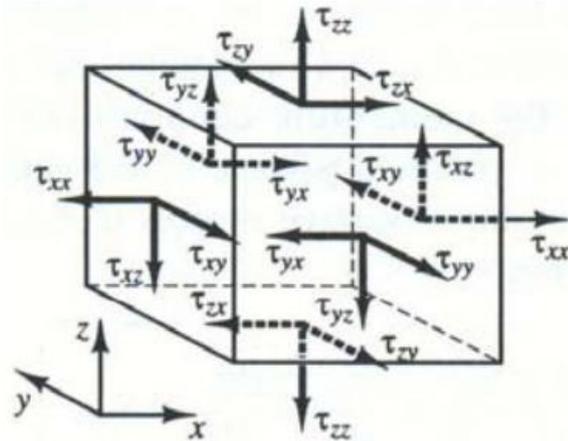
Figura 4. Distribución media de la velocidad y remolinos turbulentos.



Fuente: (Sezai, 2014) capítulo 3 página 36

Los términos de tensiones son 6 esfuerzos adicionales: 3 tensiones normales y 3 esfuerzos de corte.

Figura 5. Componentes de las tensiones en las 3 caras de un elemento de un fluido.



Fuente: (Sezai, 2014) capítulo 2 página 5.

#### 2.2.4.1 Tensiones normales:

$$\tau_{xx} = -\rho \overline{u'^2}, \quad \tau_{yy} = -\rho \overline{v'^2}, \quad \tau_{zz} = -\rho \overline{w'^2} \quad (4)$$

Donde:

$\tau_{xx}$  = esfuerzo normal en la dirección x

$\tau_{yy}$  = esfuerzo normal en la dirección y

$\tau_{zz}$  = esfuerzo normal en la dirección z

$u$  = velocidad en la dirección x

$v$  = velocidad en la dirección  $y$

$w$  = velocidad en el dirección  $z$

#### 2.2.4.2 Esfuerzos cortantes:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\overline{\rho u' v'}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\overline{\rho u' w'}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\overline{\rho v' w'} \quad (5)$$

Donde:

$\tau_{xy}$  = esfuerzo cortante en la dirección  $xy$  o  $yx$

$\tau_{xz}$  = esfuerzo cortante en la dirección  $xz$  o  $zx$

$\tau_{yz}$  = esfuerzo cortante en la dirección  $yz$  o  $zy$

**2.2.5 Presión Dinámica ( $P_d$ ).** Es la presión que depende del valor medio de la relación entre la velocidad y la densidad del fluido. Este valor de la presión dinámica es constante si la medida de la sección transversal de la tubería no varía y como el agua a 15 °C es un fluido incompresible, debe cumplirse la ley de la continuidad; el caudal que entra debe ser igual al caudal que sale del volumen de control.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho * v^2 \quad (6)$$

Donde:

$P_d$  = presión dinámica en MPa

**2.2.6 Presión Estática ( $P_s$ ).** Es la presión que no depende de la velocidad del fluido; en la práctica en las pequeñas tuberías, se puede medir con tubos piezométricos. Además, esta presión actúa en todas las direcciones por igual y formando un ángulo recto con la superficie que contenga el fluido; es la condición habitual de fuerza que ejerce el agua sobre las paredes de la tubería durante la operación de la central. Produce como consecuencia una variación de tensiones en el blindaje. Generando el fenómeno del golpe de ariete (CASTILLO OROZCO, 2012).

$$P_s = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Donde:

$P_s$ = presión estática, en MPa

$F$ = fuerza ejercida la pared, en N.

$A$ = área del accesorio, en m<sup>2</sup>.

**2.2.7 Presión Total ( $P_0$ ).** Es la suma de las presiones estática y dinámica que se producen en el blindaje causado por el flujo de agua. Esta presión se la conoce como presión de operación.

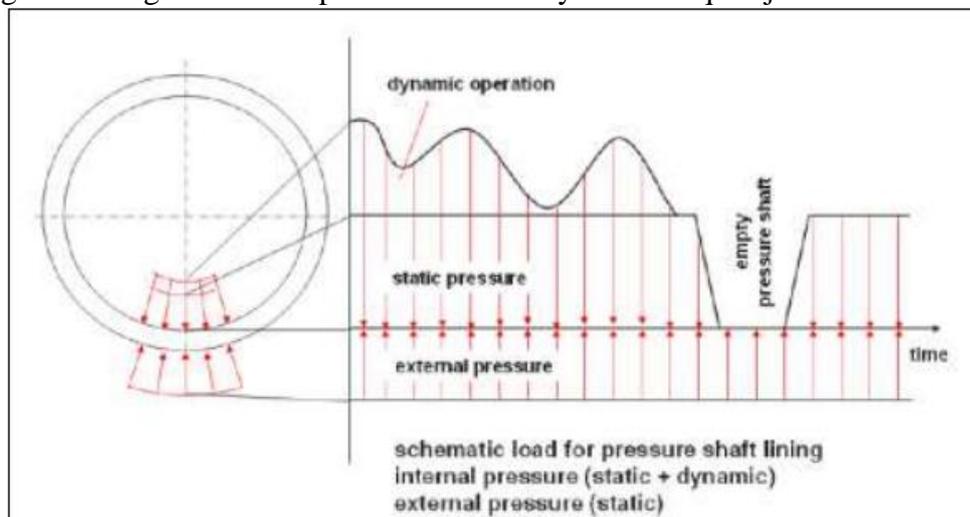
Donde:

$$P_0 = P_s + P_d \quad (8)$$

$P_0$ = presión total, en Mpa

En la figura 5 se muestra el efecto de las cargas de la presión externa, estática y dinámica (estas 2 últimas forman la presión interna en la tubería) en función de periodos de tiempo. Para este trabajo no se tomará en cuenta el valor de la presión externa (Garcia Valdeolivas, 2013).

Figura 6. Diagrama de las presiones internas y externas que ejercen en la tubería.



Fuente: <http://www-it.jwes.or.jp/proceedings/en/3-04.pdf>

**2.2.8 Golpe de ariete.** Es un fenómeno que se produce al cortar rápidamente la circulación de un fluido en una tubería, al cerrar una compuerta o válvula, provocando que la velocidad baje a un valor de cero, esto crea un aumento de presión; la tubería se expande. La densidad del agua se incrementa porque trata de comprimirse; se crea una onda con dirección al embalse que provoca que la energía cinética se transforme en energía elástica de deformación y compresión (*García Valdeolivas, 2013*).

Este fenómeno es transitorio puesto que, la velocidad no es constante en un transcurso de tiempo y puede variar desde un valor máximo hasta llegar completamente a cero. Para evitar daños en la tubería es necesario evacuar esta onda por medio de una chimenea de equilibrio; esto permite aliviar las tensiones del sistema (*CASTILLO OROZCO, 2012*).

En el anexo A se muestra un abanico, que sirve para encontrar el valor de la sobre presión causada por el golpe de ariete, en las tuberías forzadas, pudiendo tomar un valor del 20%, 30% hasta un 60%, de la presión estática (*USBR, 1977*).

Los valores para el golpe de ariete se determinan según el tipo de turbina que se instale; en la tabla 1 se ilustra esta relación.

Tabla 1. Relaciones de la sobrepresión.

Tipo de turbina	Sobrepresión en función del salto estático (H).	
De reacción, Francis y Kaplan	1,25 a 1,50 H	2 H
De Impulsión, Pelton con 1 o 2 inyectores	1,15 a 1,25 H	>2 H
De Impulsión, Pelton con 3 o más inyectores	1,15 a 1,25 H	2 H

Fuente: Berkeley página B-7.

**2.2.9 Pérdidas.** Las pérdidas son fenómenos que se producen en el flujo a causa de la fricción de las partículas del fluido entre sí, contra la superficie del accesorio, cambios bruscos de dirección del fluido, entre otras causas (*CENGEL, y otros, 2006*).

**2.2.9.1 Teorías del coeficiente de fricción.** La fricción provoca la pérdida de carga y de energía en la tubería. Para determinar el valor del coeficiente de fricción se pueden utilizar las siguientes relaciones:

*Relación de pérdida de fricción por Manning.* Es una relación entre el caudal, diámetro, longitud de la tubería y el factor de rugosidad; para el acero se pueden tomar valores entre 0,008 a 0,012 (Singhal, y otros, 2015)

$$h_f = \frac{10,29 Q^2 n^2 L}{D^{16/3}} \quad (9)$$

Donde:

$h_f$  = pérdida de fricción

$Q$  = caudal, en m<sup>3</sup>/s

$L$  = longitud de la tubería, en m.

$D$  = diámetro de la tubería, en m

*Relación de pérdida de fricción por Darcy Weisbach.* Es una ecuación donde se relaciona la pérdida de presión causada por la fricción este fenómeno se crea por el roce del fluido cuando el flujo este totalmente desarrollado.

$$h_f = \frac{0,0826 f Q^2 L}{D^5} \quad (10)$$

*Relación de pérdida de fricción por Scobey.* Esta ecuación es adaptada para calcular las pérdidas en las tuberías con aleación de aluminio, los valores para estos coeficientes se toman entre 0.32-0.36 con apertura de la válvula se toma un valor de 0,34.

$$h_f = 0,002586 L k_s \frac{v^{1.9}}{D^{1.1}} \quad (11)$$

Donde:

$v$  = velocidad del fluido.

Además, las relaciones empíricas, se describen en las ecuaciones 12, 13 y 14.

$$f = 0,25 \log \left( \frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0.9}} \right)^{-2} \quad (12)$$

$$n = 0,0896\sqrt{fD^{1/3}} \quad (13)$$

$$K_s = 20,165f \left(\frac{Q}{D}\right) 0,1 \quad (14)$$

**2.2.9.2 Condición en régimen permanente.** Las pérdidas son causadas por los saltos hidroeléctricos; están entre el 1 al 5% del salto bruto; en proyectos grandes las pérdidas son menores al 5% del salto bruto (*Garcia Valdeolivas, 2013*).

**2.2.9.3 Pérdida hidráulica.** Las pérdidas hidráulicas de carga en la tubería se pueden calcular con la fórmula de Manning como se muestra en la ecuación 15. El coeficiente  $n$  para el acero puede tomar valor mínimo de 0.010 y valor máximo de 0.011 (*Singhal, y otros, 2015*).

$$\Delta h = \frac{n^2 v^2}{R_h^{4/3}} L \quad (15)$$

Donde:

$\Delta h$  = pérdida hidráulica,

$n$  = número de Manning

$v$  = velocidad del agua.

$R_h$  = radio hidráulico, ( $r/2$  para secciones circulares)

$L$  = longitud de la tubería.

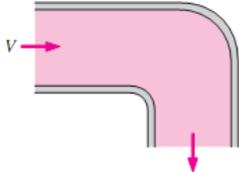
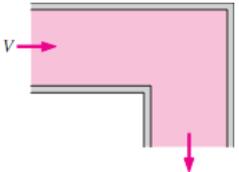
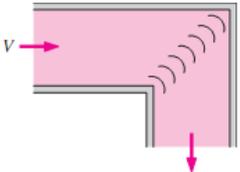
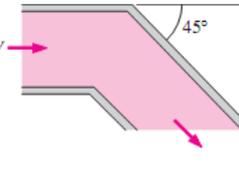
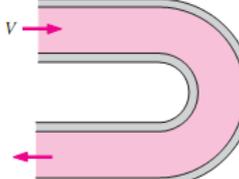
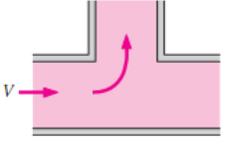
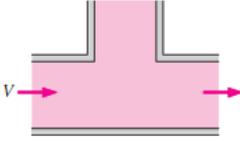
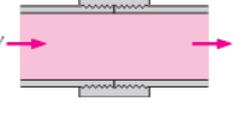
**2.2.9.4 Pérdida de carga localizada.** Este tipo de pérdida depende de la geometría (forma) del accesorio. Existen factores para el cálculo de las pérdidas, para cada accesorio según su cambio de trayectoria. Se calcula con la expresión descrita en la ecuación 16 (*CENGEL, y otros, 2006*).

$$\Delta h_i = k_L \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Donde:

$K_L$  = coeficiente de pérdidas por accesorios, ver figura 7.

Figura 7 Valores del factor  $K_L$  para distintos accesorios.

TABLE 8-4 (CONCLUDED)			
<b>Bends and Branches</b>			
<p><b>90° smooth bend:</b> Flanged: <math>K_L = 0.3</math> Threaded: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p><b>90° miter bend (without vanes):</b> <math>K_L = 1.1</math></p> 	<p><b>90° miter bend (with vanes):</b> <math>K_L = 0.2</math></p> 	<p><b>45° threaded elbow:</b> <math>K_L = 0.4</math></p> 
<p><b>180° return bend:</b> Flanged: <math>K_L = 0.2</math> Threaded: <math>K_L = 1.5</math></p> 	<p><b>Tee (branch flow):</b> Flanged: <math>K_L = 1.0</math> Threaded: <math>K_L = 2.0</math></p> 	<p><b>Tee (line flow):</b> Flanged: <math>K_L = 0.2</math> Threaded: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p><b>Threaded union:</b> <math>K_L = 0.08</math></p> 
<b>Valves</b>			
<p><i>Globe valve</i>, fully open: <math>K_L = 10</math> <i>Angle valve</i>, fully open: <math>K_L = 5</math> <i>Ball valve</i>, fully open: <math>K_L = 0.05</math> <i>Swing check valve</i>: <math>K_L = 2</math></p>	<p><i>Gate valve</i>, fully open: <math>K_L = 0.2</math> closed: <math>K_L = 0.3</math> closed: <math>K_L = 2.1</math> closed: <math>K_L = 17</math></p>		

Fuente: (CENGEL, y otros, 2006)

## CAPITULO III

### 3. SÍNTESIS DEL DISEÑO DE UNA TUBERÍA DE PRESIÓN Y ACCESORIOS.

Una tubería diseñada para un sistema hidráulico de una hidroeléctrica tiene que soportar presiones internas y externas; en las aproximaciones del cuarto de máquinas se tienen las presiones internas más altas causadas por el golpe de ariete (García Valdeolivas, 2013).

#### 3.1 Cálculo del diámetro

Considerando la optimización del diseño de la tubería de presión en las centrales hidroeléctricas, las relaciones empíricas se pueden agrupar en categorías, basados en parámetros usados, para determinar el diámetro óptimo de la tubería de presión.

**3.1.1** *Relación empírica de Warnick.* Esta relación fue desarrollada para pequeños proyectos hidroeléctricos; está en función de la descarga (Singhal, y otros, 2015).

$$D_e = 0,72Q^{0,5} \quad (17)$$

Donde:

$D_e$  = diámetro óptimo exterior de la tubería de presión.

Q = descarga

**3.1.2** *Relación empírica entre la potencia instalada y la altura.* El cálculo del diámetro de la tubería de presión está en función de la capacidad instalada y el punto de altura ( $H_r$ ). Esta relación fue desarrollada por Bier en 1945, Sarkaria en 1979 y Moffat en 1990 (Singhal, y otros, 2015).

**3.1.2.1** *Relación de Bier.*

$$D_e = 0,176\left(\frac{P}{H_r}\right)^{0,466} \quad (18)$$

Donde:

$P$  = capacidad instalada, en MW.

$H_r$  = punto de altura, en m.

### 3.1.2.2 Relación de Moffat (1990)

$$D_e = \frac{0,52P^{0,43}}{H_r^{0,60}} \quad (19)$$

**3.1.2.3 Relación de Warnick (1984).** Desarrolla en 1984 una fórmula para calcular el diámetro óptimo de la tubería de presión para hidroeléctricas, teniendo relaciones para saltos entre 60m a 315m y potencias entre 154MW a 730MW (Singhal, y otros, 2015). (Fahlbush, y otros, 1987)

$$D_e = \frac{0,72P^{0,43}}{H_r^{0,63}}. \quad (20)$$

**3.1.3 Relaciones empíricas entre el caudal y la altura.** El cálculo del diámetro está en función de la descarga ( $Q$ ) y el punto de altura  $H_r$ . Existen ecuaciones desarrolladas por Voetsch y Fresen 1938, USBR 1986, Fahlbusch 1987 entre otros (Singhal, y otros, 2015).

#### 3.1.3.1 Según el código USBR (1986).

$$D_e = \left( \frac{4Q}{0,125 \cdot 3,14(2gH_r)^{0,5}} \right)^{0,5} \quad (21)$$

#### 3.1.3.2 Según Falbuch (1987) se tiene la relación.

$$D_e = \frac{1,12Q^{0,45}}{H_r^{0,12}} \quad (22)$$

## 3.2 Espesor

El valor del espesor puede variar entre 15 - 35 mm incluso hasta 60 mm dependiendo de las condiciones de operación. El espesor se puede reducir si se utilizan regulizadores

apropiados. Para hallar el valor del espesor se aplica la relación en función del diámetro como se muestra en la ecuación 23 según la (USBR, 1977).

$$T_{min}(mm) = \frac{D+20}{400} \quad (23)$$

### 3.3 Cargas

El diseño tiene que demostrar la seguridad de, resistir la presión interior, principalmente cuando se produce el golpe de ariete y en el caso de los túneles subterráneos debe soportar la presión exterior.

Las cargas para el cálculo de las tuberías se pueden agrupar como:

- Cargas sísmicas.
- Cargas muertas
- Cargas de llenado y vaciado (intermitentes).
- Cargas de operación.

En la tabla 2 se muestra una agrupación de las combinaciones de las cargas que se deben tomar en cuenta para el diseño de la tubería de presión (Hachem, y otros, 2009).

Tabla 2. Combinación de las cargas de trabajo.

Table 2: Loads and load combinations (normal, intermittent, emergency and exceptional) for steel lining design, according to the three recommendations: CECT [1980], USACE Manual [1995] and Indian standards [1996]														
Loads	Loading combinations													
	Normal					Intermittent				Emergency		Exceptional		
Construction	X											X		
Live							X	X				X	X	
Dead	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Intermittent							X							
Service No. 1			X			X		X						
Service No. 2				X					X					
Service No. 3					X	X								
Emergency No. 1									X	X				
Emergency No. 2										X				
Exceptional No. 1													X	
Exceptional No. 2														X
Exceptional No. 3														X
Considered in the recommendation														
C.E.C.T.		O	O	O			O					O	O	O
EM 1110-2-3001	O		O	O			O	O		O				
Indian Standards			O		O	O	O			O			O	O

Fuente: (Hachem, y otros, 2009) página 146

En este trabajo el estudio se concentrará en las cargas de operación, principalmente en las cargas vivas, servicio y excepcionales.

**3.3.1 Cargas Vivas.** Son las cargas que se producen por el funcionamiento, aparecen por el salto máximo estático (provocado por el golpe de ariete), salto mínimo, y presión máxima. Estas cargas son constantes durante la vida útil de la hidroeléctrica y su valor depende de la operación.

**3.3.2 Cargas excepcionales.** Estas pueden generar, cuando se produce cambios en el caudal tales como el cierre rápido de las válvulas, apertura y cierre rítmico de las válvulas (Garcia Valdeolivas, 2013).

Tiempo para el cierre rápido.

$$T=2L/a \tag{24}$$

Donde:

$L$ = longitud de la tubería, en m

$a$ = velocidad, en m/s

$T$ = tiempo, en s.

Tiempo para la apertura y cierre rítmico.

$$T=4L/a \tag{25}$$

Tabla 3. Factores de tensiones.

Table 3: Allowable stresses in terms of what is used by some organizations and codes															
Organization standard	Reference	Load combination													
		Normal				Intermittent				Emergency		Exceptional			
		Without rock mass participation		With rock mass participation		Without rock mass participation		With rock mass participation		Without rock mass participation	With rock mass participation	Without rock mass participation	With rock mass participation		
		%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>u</sub>
AISI	Brekke after AISI	100	67												
C.E.C.T.	C.E.C.T. (1980)	91		50		100								68-100	56
PG&E	Brekke after PGE	100	67	67	33										
SCE	Brekke after SCE														
USACE	EM 1110-2-3001	50	25			67	33			100	50				
USBR	Brekke after USACE	100	67												
Indian Standards	IS (1995)	60	33	90	67	67	40	100		90	60	100		100	

Fuente: (Hachem, y otros, 2009) página 147

### 3.4 Coeficiente de seguridad

Los coeficientes de seguridad para revestimiento de acero en túneles se calculan de acuerdo a las ecuaciones 26 y 27. Se define por los esfuerzos de referencia sobre el esfuerzo equivalente, también se puede expresar el factor de seguridad en función de la presión de inestabilidad sobre la presión de sollicitación. Estas presiones aparecen por el paso del fluido por el accesorio.

$$C' = \frac{\sigma_{referencia}}{\sigma_{equivalente}} \quad (26)$$

$$C' = \frac{P_{cr}}{P_d} \quad (27)$$

Donde:

C' = factor de seguridad.

P<sub>cr</sub> = presión crítica de inestabilidad, en MPa.

P<sub>d</sub> = presión de sollicitación, en MPa.

Tabla 4. Coeficiente de seguridad.

COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA TUBERÍA BLINDADA EN TÚNEL		Cargas permanentes		Fuerzas intermitentes		Fuerzas excepcionales o accidentales					
		Tubería cilíndrica	Bifurcaciones o piezas especiales	Llenado o vaciado	Presión exterior	Pruebas de presión in situ	Hormigonado	Inyecciones	Golpes de ariete	Sismo	Pruebas en fábrica y
Condición del revestimiento de acero		Llena	Llena	Medio llena	Vacía	Llena	Vacía	Vacía	Llena	Llena	Vacía
Tipo de coeficiente de seguridad		C'	C'	C'	C''	C'	C'	C''	C'	C'	C'
En túnel revestido de hormigón sin colaboración de la roca		1,5	1,8	1,3	1,6	1,3	1,5	2	1	1	1,4
En túnel revestido de hormigón con colaboración de la roca	Sólo se considera el revestimiento de acero	1,1	1,5	1	1,6	1	1,5	2	-	-	-
	Sección mixta revestimiento de acero +hormigón + roca	2	2,5	-	1,6	1,8	-	2	-	-	-

Fuente: (CECT)

**3.4.1 Tensión admisible.** Es la carga máxima que se determina según el tipo de material; no permite las deformaciones de los materiales de manera permanente. Para los

cálculos de las tuberías forzadas se utiliza el criterio de límite de tensión admisible del acero.

Tabla 5. Tensiones admisibles.

Organization standard	Reference	Load combination														
		Normal				Intermittent				Emergency				Exceptional		
		Without rock mass participation		With rock mass participation		Without rock mass participation		With rock mass participation		Without rock mass participation		With rock mass participation		Without rock mass participation	With rock mass participation	
%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	%f <sub>y</sub>	%f <sub>a</sub>	
AISI	Brekke after AISI	100	67													
C.E.C.T.	C.E.C.T. (1980)	91		50		100								68-100	56	
PG&E	Brekke after PGE	100	67	67	33											
SCE	Brekke after SCE															
USACE	EM 1110-2-3001	50	25			67	33			100	50					
USBR	Brekke after USACE	100	67													
Indian Standards	IS (1995)	60	33	90	67	67	40	100		90	60	100		100		

Fuente: (Hachem, y otros, 2009)

Para aceros con límites inferiores a 300MPa se aplica un margen de seguridad como se muestra en la tabla 6; y para aceros de alta resistencia de trabajo debe ser el límite elástico como al límite último (Hachem, y otros, 2009).

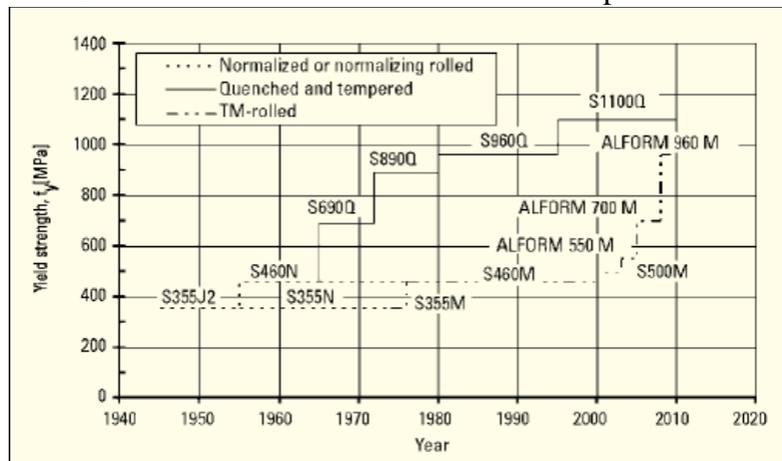
Tabla 6. Límite elástico en función del golpe de ariete.

Condición de Diseño	Límite Elástico	Límite Último
Golpe de Ariete NORMAL	1,67	2,63
Golpe de Ariete de EMERGENCIA	1,04	1,64

Fuente: (Desing criteria for exposed hydro penstocks, 1978)

**3.4.2** *Materiales de construcción para los accesorios.* En diferentes estudios se han desarrollado aleaciones para la fabricación de anillos de acero para las tuberías de presión, con normalizaciones en función del límite de fluencia.

Tabla 7. Selección de materiales en función de la presión de trabajo.



Fuente: (Hachem, y otros, 2009), página 147.

En la actualidad existen grados de resistencia superiores a 1110MPa, pero los aceros de 960MPa de resistencia están estandarizados.

### 3.5 Métodos para dimensionar los accesorios

**3.5.1** *Te.* Es un accesorio que permite la distribución del flujo de fluido. Su geometría normalmente es de tres diámetros iguales como se muestra en la figura 8, su conexión puede ser roscada hasta las ocho pulgadas, superadas este valor se recomienda utilizar bridas. Cuando se tiene que fabricar diámetros grandes se utilizan láminas de acero.

**3.5.1.1** *Cálculo para la dimensión de la cruz.* Es un accesorio diseñado para distribuir la trayectoria de un fluido, Las dimensiones de la te o cruz se calcula de acuerdo a la ecuación 28.

$$A = 0,5D_0 + fD_0. \quad (28)$$

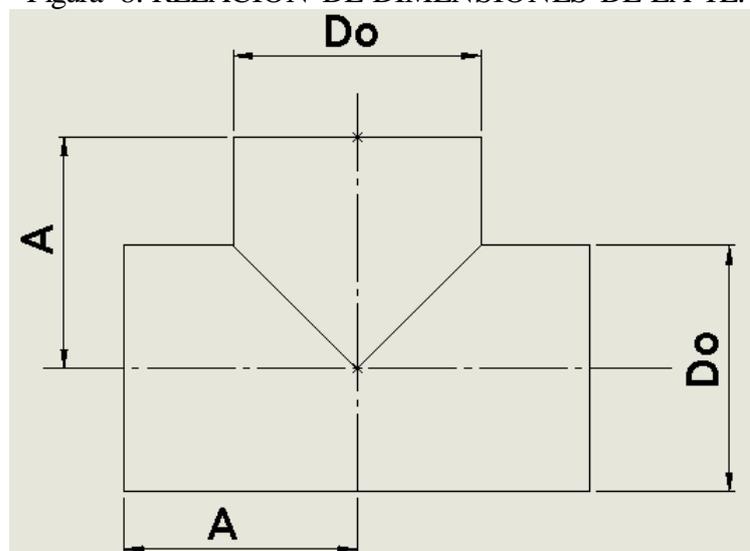
Donde:

$A$ = longitud de la cruz desde la línea central para el final.

$fD_0$ = factor para el cálculo de  $D_0$  de una te, lateral.

$D_0$ =diámetro cónico de la te.

Figura 8. RELACIÓN DE DIMENSIONES DE LA TE.



Fuente: ANSI/AWWA C208-12.

**3.5.2** *Codo.* Es un accesorio que permite cambiar de dirección del flujo de fluidos, debido al cambio de dirección se producen altas fuerzas en la superficie interna del codo, en un codo mitrado, es necesario suavizar la geometría donde el ángulo adecuado de flexión  $\Delta$ , sea lo más bajo posible para no producir cambios bruscos de trayectorias.

Para un diseño específico de un codo se tienen que considerar características hidráulicas, espacios requeridos, contracciones de manufacturación, tensiones considerables, y cortes especiales centrados en una línea común de nominada R ver figura 9.

Las dimensiones para la fabricación de los codos de acero recomendadas son las siguientes relaciones.

**3.5.2.1** *Cálculo del radio recomendado (R).*

$$R = n_c \cdot D_o \quad (29)$$

Donde:

$R$  = radio de la línea central ver figura 10.

$n_c$  = factor multiplicador

$D_o$  = diámetro externo de la tubería de acero.

**3.5.2.2** *Cálculo de la longitud tangencial del codo (T).*

$$T = n_c \cdot D_o \cdot \tan\left[\frac{\Delta}{2}\right] \quad (30)$$

Donde:

$\Delta$  = Angulo adecuado de deflexión.

**3.5.2.3** *Cálculo de la longitud mínima recomendada del codo (L).*

$$L = n_c \cdot D_o \cdot \tan\left[\frac{\Delta}{2}\right] - D_o(nc - 0,5) \tan\left[\frac{\Delta}{2k}\right] + fD_o \quad (31)$$

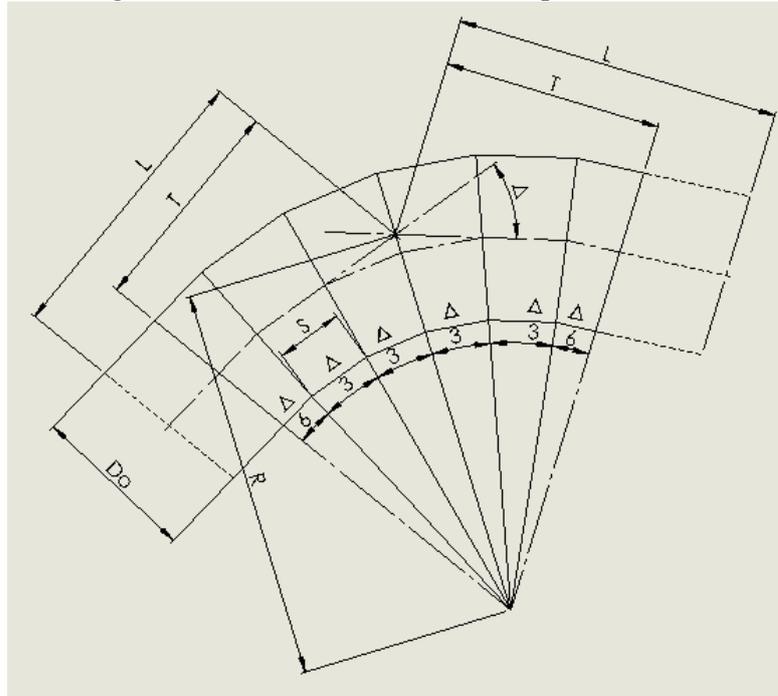
**3.5.2.4** *Cálculo de la longitud del segmento interior del codo (S).*

$$S = Do(2nc - 1) \tan \left[ \frac{\Delta}{2k} \right] \quad (32)$$

Donde:

$K$  = variable escalar

Figura 9. Relación de dimensiones para el codo.



Fuente: ANSI/AWWA C208-12

Según el tipo de ángulo que forma el codo tenemos que el factor  $K$  será:

$K=3$  para un codo de  $45^\circ < \Delta \leq 67.5^\circ$

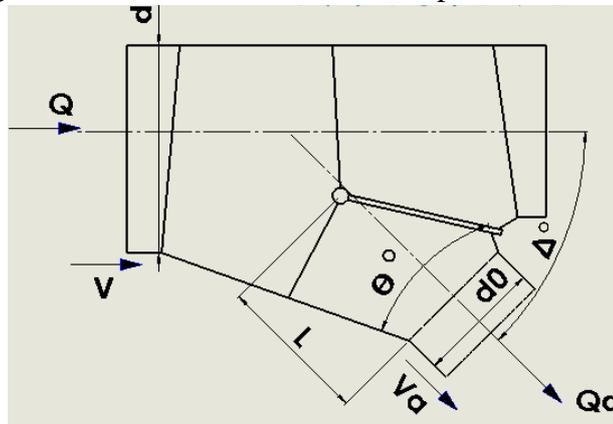
$K=4$  cuando  $67.5^\circ < \Delta \leq 90^\circ$ .

**3.5.3 Bifurcador.** Es un accesorio que divide al flujo de fluidos en una manera muy fuerte provocando que se generan varios esfuerzos de valores altos. Cuando se necesita este accesorio en un tamaño grande se utiliza láminas de acero para su fabricación. Debido a que es un accesorio que va a soportar grandes presiones, es necesario colocar una lámina de acero como un refuerzo en las descargas.

El bifurcador se puede dimensionar con los coeficientes de relación del caudal de desvío sobre el caudal principal como se observa en la tabla 8. Se puede encontrar los valores de

las variables dimensionadas en la norma USBR (1977, pág. 11).

Figura 10. Relación de dimensiones para el bifurcador.



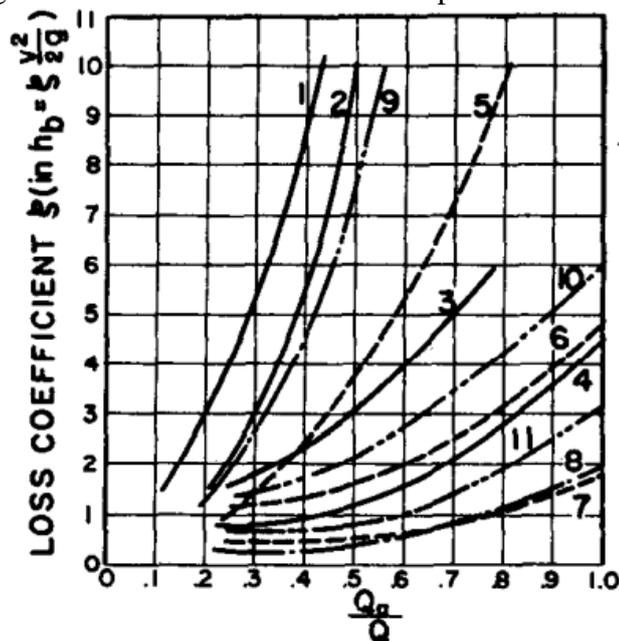
Fuente: (USBR, 1977) página 11.

Tabla 8. Dimensiones para el bifurcador.

No de Curva	d0/d	Δ	θ	L
5	0,349	60°	13 1/2°	2,7 da
6	0,581	90°	12 1/2°	2,7 da
7	0,581	60°	13	2,6 da
8	0,581	45°	13 1/2°	2,0 da

Fuente: (USBR, 1977) página 11.

Figura 11. Relación de dimensiones para el bifurcador.



Fuente: (USBR, 1977) página 11.

## 3.6 Central hidroeléctrica

**3.6.1** *Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas.* Para clasificar las centrales hidroeléctricas se consideran algunos parámetros como, el tipo de construcción, capacidad hidráulica, potencia instalada:

**3.6.1.1** *Según el tipo de embalse:*

- Centrales de pasada
- Centrales de regulación
- Centrales de acumulación.

**3.6.1.2** *Según al tamaño de saltos:*

- De pequeña altura:  $H \leq 14,99$  m
- De mediana altura:  $15 \leq H \leq 49,99$  m
- De gran altura:  $H \geq 50$  m

**3.6.1.3** *Según la potencia instalada:*

- Micros centrales:  $P < 1,2$  MW
- Centrales de pequeña potencia:  $1,2 \text{ MW} \leq P < 90,8 \text{ MW}$ .
- Centrales de mediana potencia:  $10,0 \text{ MW} \leq P < 47,8 \text{ MW}$
- Centrales de gran potencia  $47,8 \text{ MW} \leq P < 3600 \text{ MW}$

**3.6.2** *Funcionamiento.* Por medio de una presa se acumula cierta cantidad de agua formando un embalse. Con el fin de generar un salto cuya energía pueda transformarse de potencial a energía eléctrica, se sitúa aguas arriba de la presa una toma de admisión protegida por una rejilla metálica.

Esta toma de admisión tiene una cámara de compuertas que controla la admisión del agua a una tubería forzada que tiene por fin llevar el agua desde las tomas hasta las máquinas de la central. El agua en la tubería forzada transforma su energía potencial en cinética, es decir, adquiere velocidad.

Al llegar a las máquinas, actúa sobre los álabes del rodete de la turbina, haciéndolo girar y perdiendo energía. Ya hace que el generador produzca energía.

### 3.7 Principios de la Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluido computacional es una herramienta informática que es útil para el campo de la ingeniería de desarrollo, se utiliza en varios sectores como hidráulica (redes de tuberías), química, metalurgia, aeroespacial. Simulación de procesos con o sin transferencia de calor, mezcla entre fluidos distintos, etc. Su aplicación se centra en: a) resolver principalmente las tres leyes que gobiernan el flujo de fluidos, b) la formulación de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estas tres leyes, y, c) discretizar estas ecuaciones y transformarlas en algebraicas para encontrar el valor de las variables de estudio que pueden ser presión, velocidad, caudal, etc. Las ecuaciones de estudio son:

- Ecuaciones diferenciales o parciales
- Ecuaciones integrales.

**3.7.1 Usos.** El CFD es una herramienta informática útil para predecir el comportamiento del flujo de fluido en algún cuerpo, (este flujo puede ser interno o externo) estudia analizando los fenómenos físicos como es la velocidad, presión, tensiones, etc. el estudio computarizado puede realizar simulaciones visuales y recoger datos de los valores de los fenómenos físicos.

La confiabilidad de los valores de estos resultados depende del correcto uso de los paquetes computacionales.

El uso del CFD tiene el propósito de:

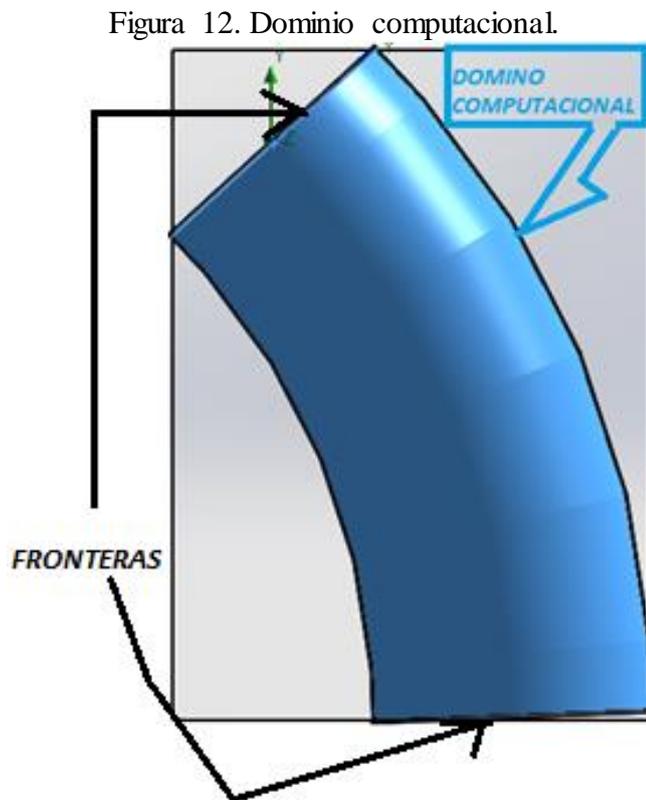
- Hallar un diseño óptimo que satisfaga las condiciones necesarias de uso en algún elemento.
- Determinar el comportamiento de circulación del flujo del fluido.
- Revisar (mejorar) y desarrollar nuevos diseños. Antes de construirlos físicamente.
- Identificar fenómenos físicos como: esfuerzos, tensiones, cavitación, velocidad, flujo másico, caudal, etc. y sus causas, verificar si estos fenómenos pueden ocasionar alguna inconveniencia como deterioro en el equipo o accesorio.

- Tener una perspectiva real del funcionamiento o comportamiento de algún elemento o equipo.

Entre otros propósitos, que dependen de la necesidad de encontrar algún objetivo específico que se plante, ya que el CFD estudia se utiliza para analizar fluidos compresible, incompresibles, newtonianos, no newtonianos estables, no estables transitorios etc.

**3.7.2** *Fundamento matemático del CFD.* La dinámica de fluido computacional es una rama de la mecánica de fluidos en donde se aplica métodos de solución numérica que sirven para resolver la ecuación de transporte de flujo estacionario y no estacionario.

**3.7.2.1** *El Dominio Computacional.* Es una región que puede ser bidimensional o tridimensional (en DFC es la representación líquido) donde se solucionan las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos.

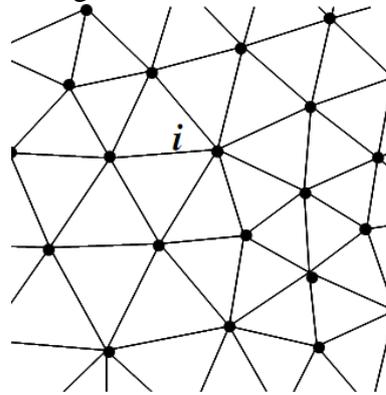


Fuente: Autor

**3.7.2.2** *Malla.* Conocida como red de nodos; es la división del dominio computacional en pequeños elementos llamadas celdas, si el análisis es en 2D el dominio de las celdas

son áreas, para un análisis en 3D el dominio de las celdas son volúmenes (Vaughan, 2009).

Figura 13. Malla en 2D.



Fuente: Autor

**3.7.2.3 Ecuaciones para el desarrollo del CFD.** Las ecuaciones de transporte de continuidad (conservación de la masa) y Navier-Stokes (segunda ley de Newton), ayudan a predecir el movimiento del fluido, su solución se lo hace con una computadora dado por su complejidad (Knut, 2005).

**3.7.2.4 Leyes fundamentales en el flujo de fluidos.** La conservación de las leyes trata de modelar los principios físicos, en una forma de cantidad de volumen igualado al flujo que sale del volumen del control.

- Conservación de la masa.
- Conservación del momento.
- Conservación de la energía.

**3.7.2.5 Ecuación de la continuidad.** (Conservación de la masa) en un flujo de un fluido incompresible que a traviesa por un conducto cerrado no existe pérdida de masa, por lo tanto caudal que entra es igual al caudal que sale.

$$\vec{\nabla} * \vec{V} = 0 \quad (33)$$

Donde:

$\vec{\nabla}$  = gradiente vectorial.

**3.7.2.6 Ecuación de Navier-Stokes. (Ecuación de transporte):** Describe totalmente el campo de velocidad en un flujo matemáticamente y permite desarrollar las ecuaciones de conservación de la masa y momento. En el flujo de un fluido incompresible Newtoniano; permite determinar los valores de (cortes de tensiones proporcionales y la velocidad de la deformación) (CENGEL, y otros, 2006).

$$(\vec{\nabla} * \vec{V})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu \quad (34)$$

Estas dos ecuaciones representan el transporte en el dominio computacional de la cantidad de movimiento lineal.

Continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (35)$$

Donde:

$\frac{\partial u}{\partial x}$  es la derivada parcial de la velocidad en la dirección x

$\frac{\partial v}{\partial y}$  es la derivada parcial de la velocidad en la dirección y

$\frac{\partial w}{\partial z}$  es la derivada parcial de la velocidad en la dirección z

u= es la componente vectorial de la velocidad en x.

v= es la componente vectorial de la velocidad en y.

w= es la componente vectorial de la velocidad en z.

Cantidad de movimiento en x:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (36)$$

Cantidad de movimiento en y:

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

Cantidad de movimiento en z:

$$u \frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (38)$$

### 3.7.2.7 Pasos para la solución:

- Generar un dominio computacional.
- Escoger el tipo de fluido.
- Especificar las condiciones de frontera.
- Proceder a solucionar los parámetros numéricos.
- Los valores de las variables en la primera aproximación se especifican en cada celda.
- Las ecuaciones de movimiento se discretizan y se transforman en algebraicas.
- Se resuelve por iteración. En la mayoría en el centro de cada celda.
- Cuando converge la solución, las variables como el campo de flujo  $v$  y  $p$  se trazan y analizan de manera gráfica (Freziger, y otros, 2002).

**3.7.2.8 Formas de aplicación en las ecuaciones.** Se puede aplicar de dos formas a) ejecutando un balance de masa o momento en un VC fijo en el espacio-referido o b) tomar el valor de cambio de la masa con las aproximaciones Euleianas o momento en un volumen específico de la continuidad en estos movimientos a través del espacio-referido con las aproximaciones Lagrangianas (Rajesh, 2016).

Para un tiempo  $t_0$ , la partícula tiene una posición  $P(x_0, y_0)$

*Vista lagrangiana.*

- $\vec{V}_p(t_0) = \vec{V}_0$ .
- $x_0(t_0) = x_0$
- $y_p(t_0) = y_0$

*Vista Euteriana.*

- $\vec{V}(x_0, y_0, t_0) = \vec{V}_0$ .

Flujo constante.

- $\vec{V}(x_0, y_0) = \vec{V}_0$

Donde:

$\vec{V}_0$  = velocidad instantánea

$x_0$  = coordenada cartesiana en x.

$y_0$  = coordenada cartesiana en y.

**3.7.2.9** *Elementos y formas de interpolación de las funciones.* Para el caso de un mallado triangular. Los nodos de sus vértices giran en sentido anti horario, estos son llamados 1, 2 y 3. Los valores independientes de la variable  $\Phi$  es calculada y almacenada en estos puntos nodales.

De esta forma, se evalúa en un punto arbitrario  $(x, y)$  dentro el elemento puede ser aproximado con una interpolación lineal (Vaughan, 2009).

$$\Phi \approx ax + by + c \quad (39)$$

Las constantes a, b y c satisfacen las relaciones de cada nodo.

$$\Phi \approx aX_i + bY_i + c, \quad i=1, 2, 3 \quad (40)$$

Escribiendo la ecuación (25) en términos de la función.  $N_1, N_2$  y  $N_3$ , donde.

$$N_i(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{al nodo } i \\ 0, & \text{para todos los puntos opuestos del nodo } i \end{cases} \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^3 N_i(x, y) = 1, \text{ para todos los puntos en el elemento.} \quad (42)$$

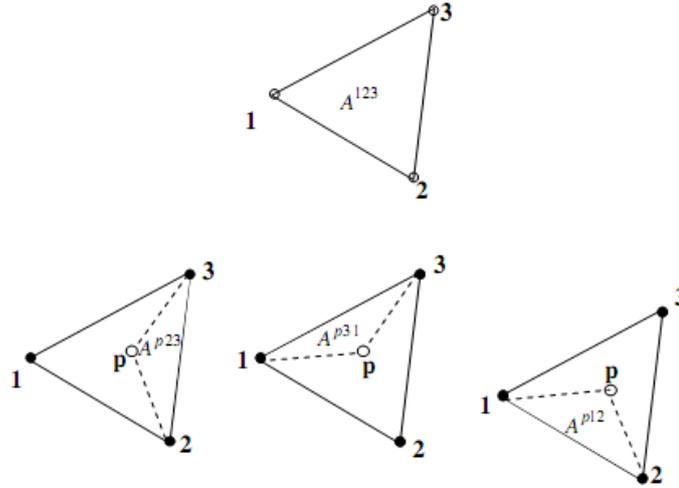
Así semejante, sobre el elemento, los campos continuos no conocidos pueden ser expresados como la combinación lineal de los valores para los nodos  $i=1, 2, 3$ .

$$\Phi(x, y) \approx \sum_{i=1}^3 N_i(x, y) \phi_i \quad (43)$$

Donde:

$\Phi$  = valores de las variables físicas como velocidad, presión, temperatura, etc.

Figura 14. Triángulos donde se almacena la información.



Fuente: (Vaughan, 2009)

Para calcular el área de los elementos de la figura 4 aplicamos:

$$A^{123} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (44)$$

$$A^{123} = \frac{1}{2} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) - x_1 (y_3 - y_2) + y_1 (x_3 - x_2)] \quad (45)$$

Y también se puede desglosar esta área respecto a un punto p con las coordenadas (p, 2,3), (p, 3,1), y (p, 1,2).

$$A^{p23} = \frac{1}{2} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) - x_p (y_3 - y_2) + y_p (x_3 - x_2)] \quad (46)$$

$$A^{p31} = \frac{1}{2} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) - x_p (y_1 - y_3) + y_p (x_3 - x_1)] \quad (47)$$

$$A^{p12} = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) - x_p (y_2 - y_1) + y_p (x_2 - x_1)] \quad (48)$$

Las formas de las funciones se definen de la siguiente manera.

$$N_1 = \frac{A^{p23}}{A^{123}}, N_2 = \frac{A^{p31}}{A^{123}}, N_3 = \frac{A^{p12}}{A^{123}} \quad (49)$$

Cuando el punto p coincide con el nodo i (=1, 2 o3) forma de la función es  $N_1 = 1$ , y

cunado el punto p es cualquier lado de un elemento opuesto al nodo i, la zona del subelemento es cero.

$$A^{p23} + A^{p31} + A^{p12} = A^{123} \quad (50)$$

La forma integral de la ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho U \cdot dS = 0 \quad (51)$$

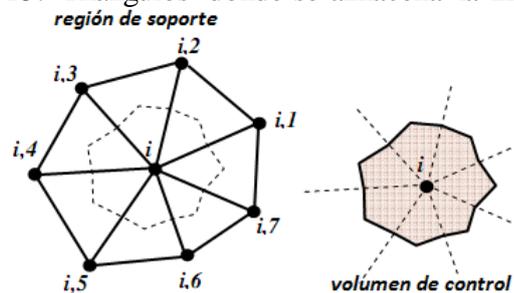
La forma diferencial de la ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (52)$$

**3.7.2.10 Región de Soporte.** La región de soporte es una área que rodea a un nodo determinado (i) en su totalidad en forma de estructuras triangulares y los límites de la región están definidos por los nodos vecinos en la figura 15 se puede apreciar a 7 nodos vecinos al nodo i, los cuales llevan información de los variables físicas, como pueden ser la velocidad, presión, etc. Y a la unión de estos nodos crean una área imaginaria que se denomina volumen de control.

Para la discretización de esta área se enumeran los nodos en sentido anti horario y se desarrolla en esta área las ecuaciones de transporte.

Figura 15. Triángulos donde se almacena la información



Fuente: (Vaughan, 2009)

**3.7.2.11 Método de Volumen finito.** Este método analiza un punto determinado en el espacio respecto con los puntos vecinos. Para aplicar el método de volumen finito MVF, es necesario integrar la ecuación (1) en función del volumen de control.

$$\int_{vc} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{vc} \nabla * (\rho \Phi \bar{u}) dV = \int_{vc} \nabla * (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{vc} S_\phi dV \quad (53)$$

Utilizando el teorema de divergencia de Gauss se transforma en integrales de superficie a los términos de convección y difusión.

$$\int_{vc} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_A \hat{n} * (\rho \Phi \bar{u}) dA = \int_A \hat{n} * (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{vc} S_\phi dV \quad (54)$$

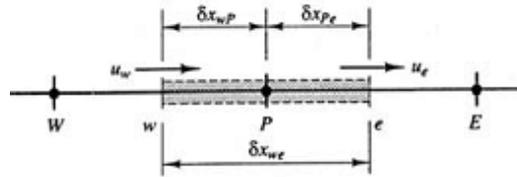
El problema es desarrollar la discretización. Para esto se calcula el término  $\Phi$  para las caras del volumen de control y a través de las fronteras (Vaughan, 2009).

Para esta demostración se aplicará en una dimensión y estado estático. Esta ecuación es gobernada por la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{d}{dx} (\rho \Phi \bar{u}) = \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + S_\phi \quad (55)$$

Para una dimensión:

Figura 16. Volumen de control para una dimensión.



Fuente: (Sezai, 2014) capítulo 5 página 2

La integración de la ec.(55) en cada VC resulta en la siguiente expresión para un flujo estático:

$$\int_{vc} \frac{d}{dx} (\rho \Phi \bar{u}) dV = \int_{vc} \frac{d}{dx} (\Gamma \frac{d\phi}{dx}) dV + \int_{vc} S_\phi dV \quad (56)$$

Aplicando el teorema de Gauss' para los términos de convección y la Difusión, y linealizando los términos fuente, la ecuación de encima resulta.

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + A(S_u + S_p \phi_p) \quad (57)$$

Donde A es la superficie lateral de la cara del VC.

Aplicando una aproximación lineal, los valores de las cargas son dadas por las siguientes expresiones.

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_w + \Gamma_P}{2} \quad (58)$$

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_P + \Gamma_E}{2} \quad (59)$$

$$(\rho u A)_w = \frac{(\rho u A)_W + (\rho u A)_P}{2} \quad (60)$$

$$(\rho u A)_e = \frac{(\rho u A)_P + (\rho u A)_E}{2} \quad (61)$$

$$\left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) \quad (62)$$

$$\left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) \quad (61)$$

$$(\rho u A \phi)_w = (\rho u A)_w \frac{\phi_W + \phi_P}{2} \quad (62)$$

$$(\rho u A \phi)_e = (\rho u A)_e \frac{\phi_P + \phi_E}{2} \quad (63)$$

Sustituyendo las ecuaciones desde (58) hasta la (63) en la eq (57) resulta:

$$(\rho u A)_e \frac{\phi_P + \phi_E}{2} - (\rho u A)_w \frac{\phi_W + \phi_P}{2} = \Gamma_e A_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) - \Gamma_w A_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) + A(S_u + S_P \phi_P) \quad (64)$$

Asignado áreas iguales  $a_P, a_W,$  y  $a_E$  para el valor del coeficiente  $\phi$  en los nodos P, W y E respectivamente la ecuación superior resulta:

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u \quad (65)$$

Donde:

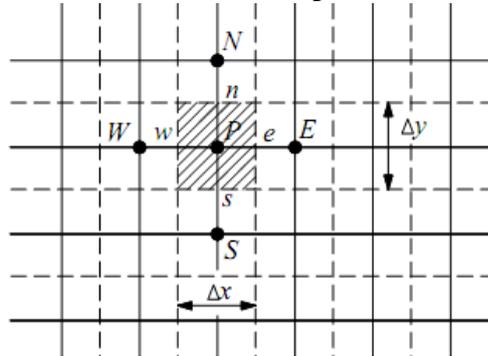
$$a_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} + \frac{(\rho u)_w}{2} \quad (64)$$

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} + \frac{(\rho u)_e}{2} \quad (65)$$

$$a_P = a_w + a_E + (\rho u)_e - (\rho u)_w \quad (66)$$

Para dos dimensiones:

Figura 17. Volumen de control para Dos dimensiones.



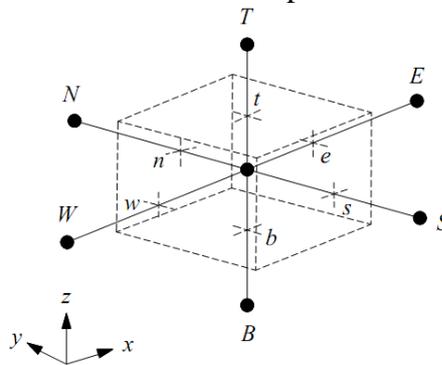
Fuente: (Sezai, 2014) capitulo 5 página 2

Cada nodo tiene cuatro nodos adyacentes los cuales se denotan con N, S, E y W; en este caso el resultado es el siguiente.

$$a_P \phi_P = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_u \quad (67)$$

Para tres dimensiones:

Figura 18. Volumen de control para Tres dimensiones.



Fuente: Autor.

Cada nodo tiene seis nodos adyacentes los cuales se denotan con N, S, E, B, T y W; en

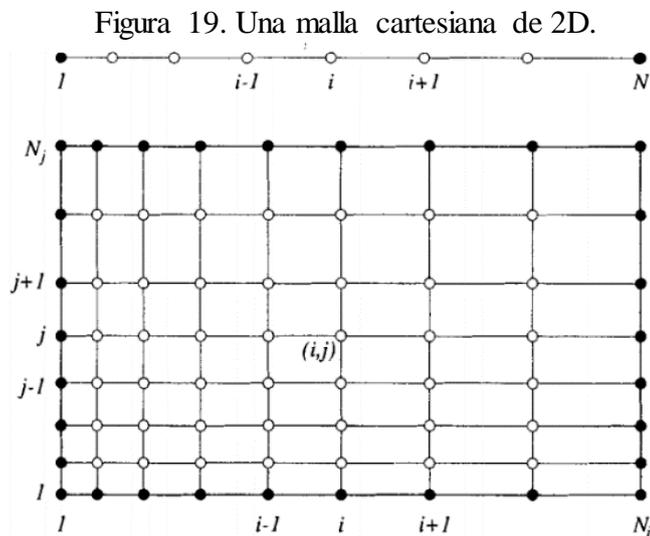
este caso el resultado es el siguiente.

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + a_T \phi_T + a_B \phi_B + S_u \quad (68)$$

**3.7.2.12 Diferencia Finita.** La siguiente ecuación aplicada en una malla cartesiana.

$$\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + q_\phi \quad (69)$$

*Conceptos Básicos.* La solución se realiza en cada nodo de una malla. Las líneas que forman la malla no deben intersecarse entre sí.



Fuente: (Freziger, y otros, 2002)

Para 2D cada nodo es identificado con unos índices,  $(i, j)$  en 2D y  $(i,j,k)$  en 3D; los nodos vecinos son definidos por un incremento o reducción por uno de sus índices por unidad. La ecuación genérica (39) es lineal en  $\phi$ . Puede ser aproximada por un sistema de ecuaciones algebraicas lineales. Cada uno de estos nodos tiene un valor desconocido de una variable.

Lo último es la relación entre el valor de la variable en aquellos nodos y algunos de los nodos vecinos reemplazando los términos en la ecuación (37) para una diferencia finita aproximada. La idea detrás de las aproximaciones de la diferencia finita es dar una dirección definida por una derivada:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x_i} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\phi(x_i + \Delta x) - \phi(x_i)}{\Delta x}. \quad (70)$$

Expansión de la Serie de Taylor. Cualquier función continua diferenciable  $\phi(x)$  en la proximidad de  $x_i$  puede ser expresada como una serie de Taylor. Para obtener expresiones de diferencia delantera (FDS).

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (71)$$

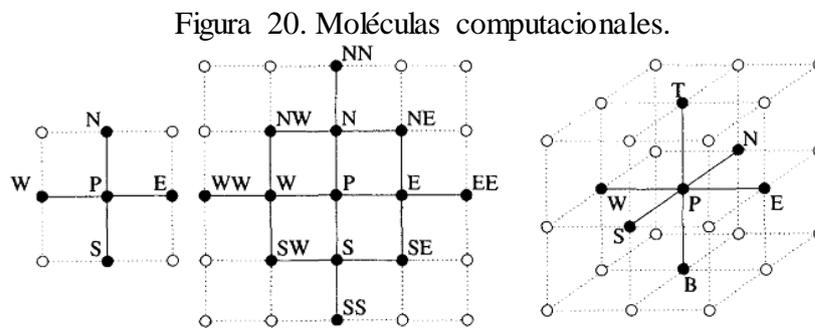
$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (72)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (73)$$

*Sistemas de ecuaciones algebraicas.* Considerando los nodos de una malla cuadriculada la aproximación de la diferencia finita provee una ecuación para cada nodo, el nodo contiene el valor de la variable y también los nodos vecinos. Analizando el caso lineal similarmente se puede obtener para el caso no lineal, el resultado de la desratización es un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de la forma [5].

$$A_p \phi_p + \sum_l A_l \phi_l = Q_p \quad (74)$$

Donde P es el nodo donde la ecuación diferencial parcial es aproximada y el índice l recorre sobre los nodos vecinos en aproximaciones de diferencia finita. Esta nodo P y sus vecinos forma la llamada molécula computacional



Fuente: (Freziger, y otros, 2002)

El número de ecuaciones no conocidas debe ser iguales, allí para cada nodo cuadrículado.

Para el cálculo de las incógnitas de estas ecuaciones se puede armar una matriz de la siguiente forma.

$$A\phi = Q \quad (75)$$

Donde A es el cuadro coeficiente matricial,  $\phi$  es un vector (o columna matricial) contiene los valores de las variables de la malla nodal, y Q es el vector que contiene el termino en el lado derecho de la ecuación (75).

Tabla.9. Subíndices para la localización de los vectores.

Posición de la cuadrícula	Notación cardinal	Posición de almacenamiento
$I, j, k$	$P$	$L=(k-1)NjNi+(i-1)Ni+j$
$i-1, i, k$	$W$	$l-Nj$
$I, j-1, k$	$S$	$l-1$
$I, j+1, k$	$N$	$l-1$
$I+1, j, k$	$E$	$L+nj$
$i, j, k-1$	$B$	$l-NiNj$
$I, j, k+1$	$T$	$L+NiNj$

Fuente: (Freziger, y otros, 2002), página 56.

Las ecuaciones algebraicas linealizadas para dos dimensiones se pueden escribirse de la siguiente forma.

$$A_{l,l-N_i} \phi_{l-N_i} + A_{l,l-1} \phi_{l-1} + A_{l,l} \phi_l + A_{l,l+1} \phi_{l+1} + A_{l,l+N_i} \phi_{l+N_i} = Q_l \quad (76)$$

Estructura matricial para la solución.

$$\begin{bmatrix} A_W & A_S A_P A_N & A_E \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \phi_W \\ \phi_S \\ \phi_P \\ \phi_E \end{bmatrix} = [Q_P] \quad (77)$$

Cada nodo es identificado con un índice l con esto la posición relativa de almacenamiento puede ser escrito.

$$A_W \phi_W + A_S \phi_S + A_P \phi_P + A_N \phi_N + A_E \phi_E = Q_P \quad (78)$$

### 3.8 Software CFD

En la actualidad existen varios programas que permiten la simulación hidráulica. Los cuales se basan en la discretización de ecuaciones y convergencia de valores de las constantes físicas involucradas en el fenómeno.

**3.8.1** *Flow simulation.* Es una plataforma del Solidworks que puede simular el flujo de fluidos, transferencia de calor, en estado estable, transitorio: y las fuerzas de fluidos fundamentales para el éxito del diseño.

- Dinámica de fluidos computacional.
- Factores de confort termico.
- Visualización de simulaciones.
- Análisis térmico de fluidos.
- Gestión térmica de dispositivos electrónicos.
- Análisis de flujo de fluidos.

**3.8.2** *Ansys Fluent.* Es una plataforma con muchos comandos para realizar modelados físicos como transporte de fluidos, transferencia de calor y aplicaciones industriales. Su interfaz de usuario es muy completa; permite realizar el estudio con las variables y condiciones fijas que el usuario requiera.

## CAPÍTULO III

### 4. ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS EN EL FLUJO DE FLUIDOS APLICANDO CFD.

El presente trabajo se refiere al análisis del flujo de fluidos en los accesorios como se mencionó en el capítulo 2, para este análisis se utilizara las plataformas computacionales SolidWorks Flow Simulation, Ansys Fluent. Estos programas permitirán realizar el estudio en forma transitoria permanente y tridimensional. Para tener una mejor precisión y presentación de los resultados.

#### 4.1 Introducción.

Una simulación en CFD se basa en tener claro el problema para poder llegar a la solución el flujo de fenómenos donde el fundamento matemático será la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes que están involucradas las leyes de la conservación de la masa y la conservación del momento (fuerza de empuje), en este estudio se puede tener dos casos. Primero flujo estable quiere decir velocidad constante en el transcurso de tiempo. Segundo flujo transitorio es la variación de la velocidad en determinados lapsos de tiempo en este caso se refiere al golpe de ariete.

Para realizar un correcto estudio es necesario tener en cuenta tres pasos que son:

- Pre-proceso
- Proceso
- Post-proceso.

Donde el pre-proceso se refiere a la adquisición de datos; pueden ser teóricos o experimentales y tener la condición de la geometría especificada en el capítulo 2 además en este paso se realiza el CAD, mallado, el ingreso de las condiciones de frontera y la programación de metas que sean necesarios.

El proceso es donde se involucra a la solución numérica que realice el programa. Para este caso se aplicara el método de volumen finito. El post-proceso se refiere al muestreo de los resultados en gráficos, tablas.

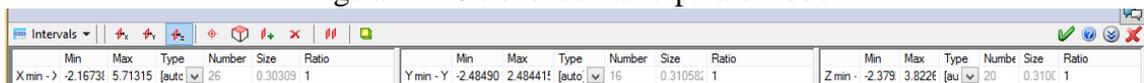
## 4.2 Mallado.

El mallado en 3D consiste en dividir el dominio computacional en pequeños volúmenes de control de diferentes formas como: cubo, tetraedros, prismas, entre otros. El tamaño es relativo en algunos casos dependiendo la forma de la geometría, entre más pequeñas sean las divisiones el resultado será más aproximado al real. En este trabajo se lo realizara con divisiones tipo cubo para el estudio en solidworks flow simulation y tetraedro en ansys fluent.

**4.2.1 Mallado en solidworks y calidad.** El mallado en Solidworks divide al dominio computacional en forma de cubos los cuales se pueden cambiar su tamaño para tener mayor precisión en los resultados.

Para garantizar la uniformidad de la malla se debe cumplir con un factor de tamaño denominado Ratio, este factor multiplica el valor del tamaño (Size ver en la figura 21) de la arista del cubo en cada eje x, y, z. Para una mayor uniformidad este valor debe ser uno en cada eje o si es necesario aumentar el tamaño de las aristas es recomendable que los valores del tamaño Size sean equivalentes.

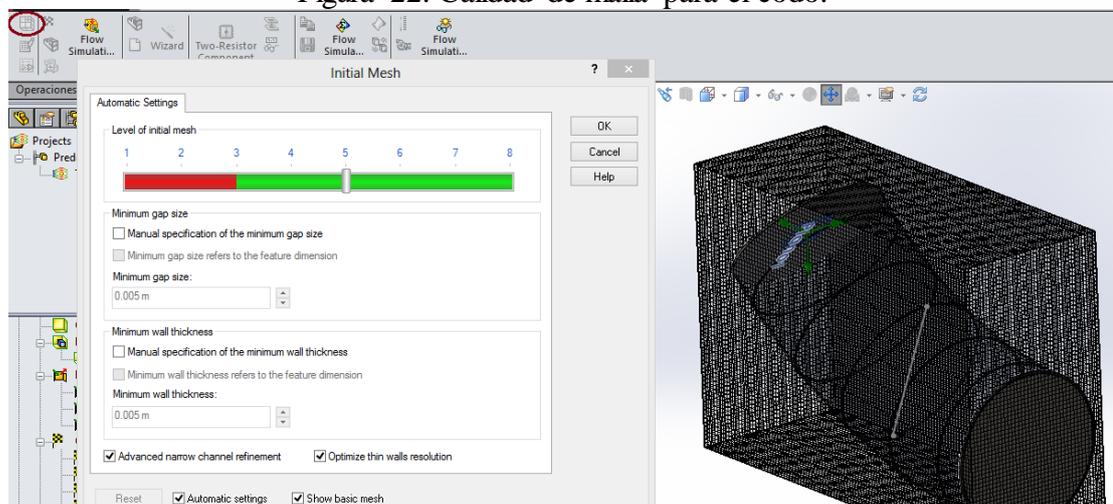
Figura 21. Calidad de malla para el codo.



	Min	Max	Type	Number	Size	Ratio		Min	Max	Type	Number	Size	Ratio		Min	Max	Type	Number	Size	Ratio
X min ->	-2.1673	5.71315	[auto]	25	0.30309	1	Y min - Y	-2.48490	2.48441	[auto]	16	0.31058	1	Z min - Z	-2.379	3.8226	[au]	20	0.310	1

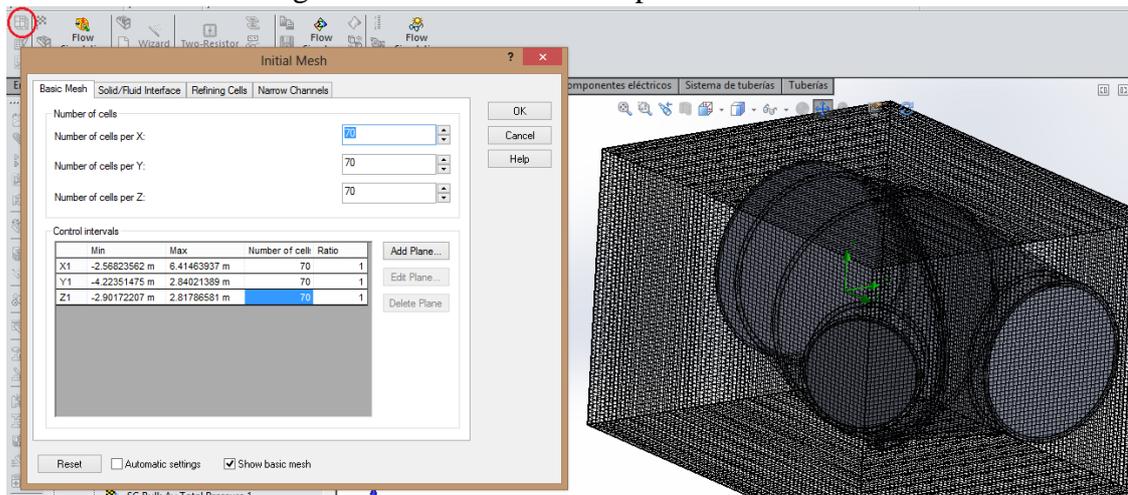
Fuente: Autor

Figura 22. Calidad de malla para el codo.



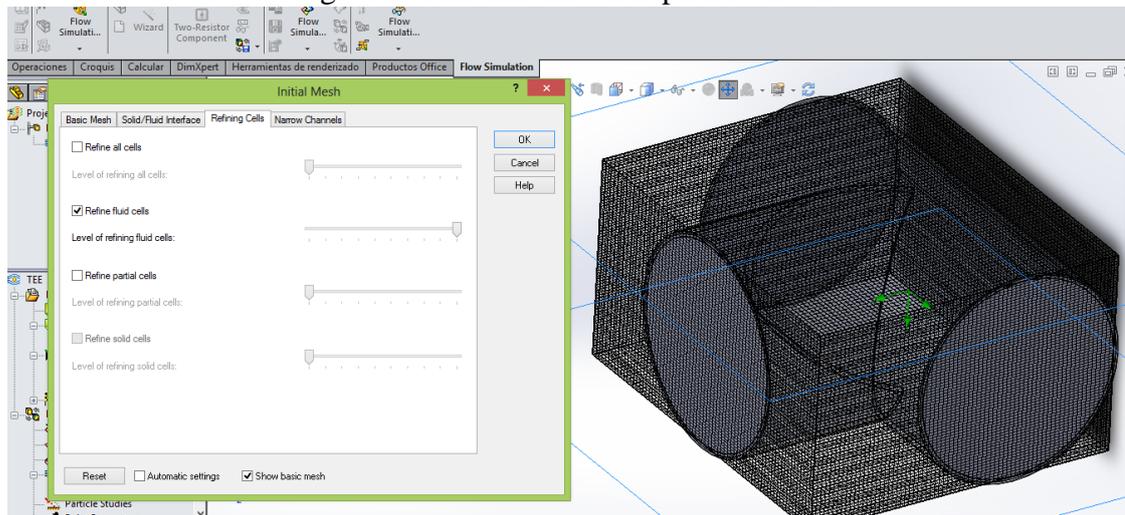
Fuente: Autor

Figura 23. Calidad de malla para el Bifurcador.



Fuente: Autor

Figura 24. Calidad de malla para en la Te.

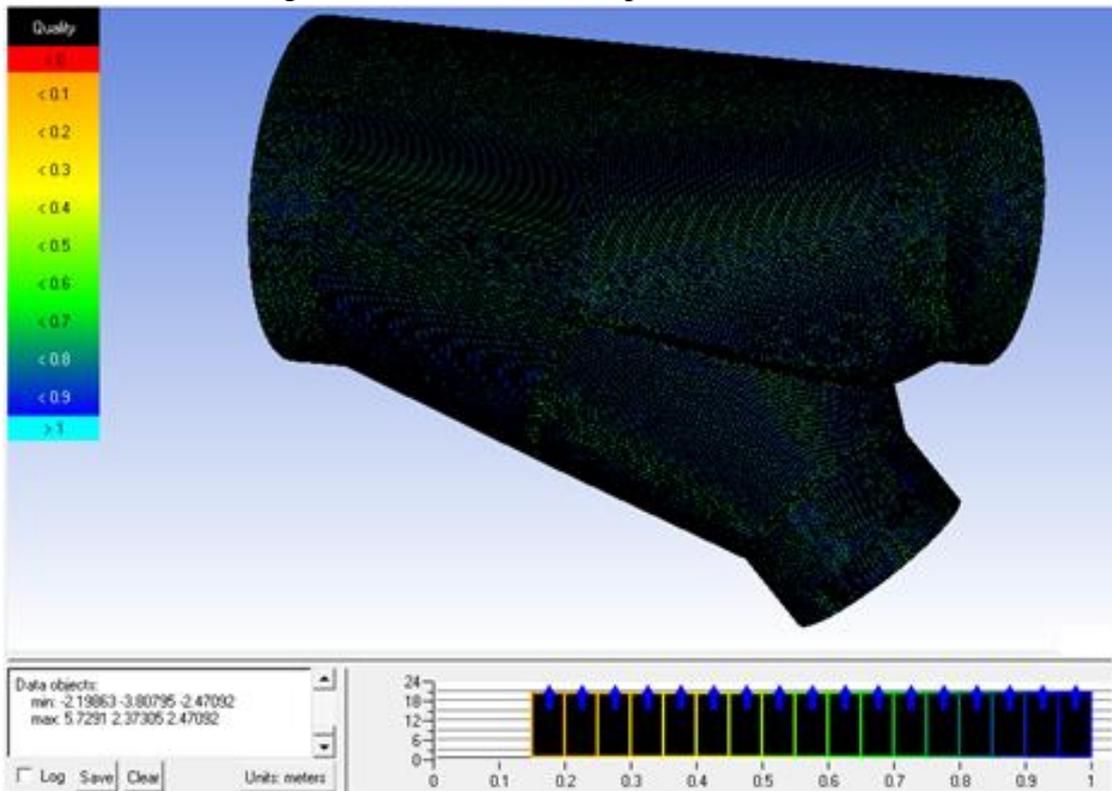


Fuente: Autor

**4.2.2** *Mallado en Ansys y calidad.* Para el mallado de ANSYS se utilizara la plataforma llamada ICEM-CFD. En donde el dominio computacional de lo dividirá en forma de tetraedros, estos son comúnmente usados para un flujo turbulento y sus resultados son más confiable cuando se analiza a un flujo inestable.

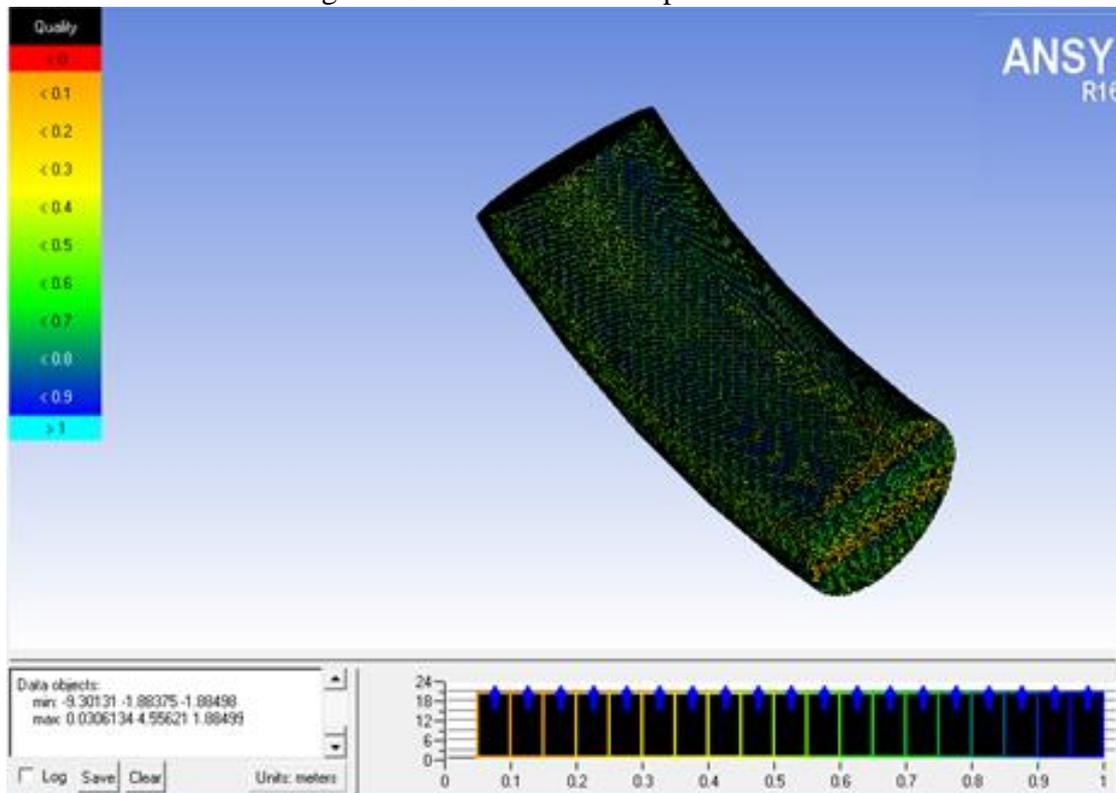
La calidad depende del tamaño de los tetraedros, teniendo como indicadores desde un valor de aproximación de cero que es una calidad de malla muy mala, hasta un valor de aproximación de 1 que es de una calidad excelente. Ansys recomienda que se puede definir como un buen mallado cuando se toma valores mayores de 0.01. (Ansys-Inc., 2015)

Figura 25. Calidad de malla para el Bifurcador.



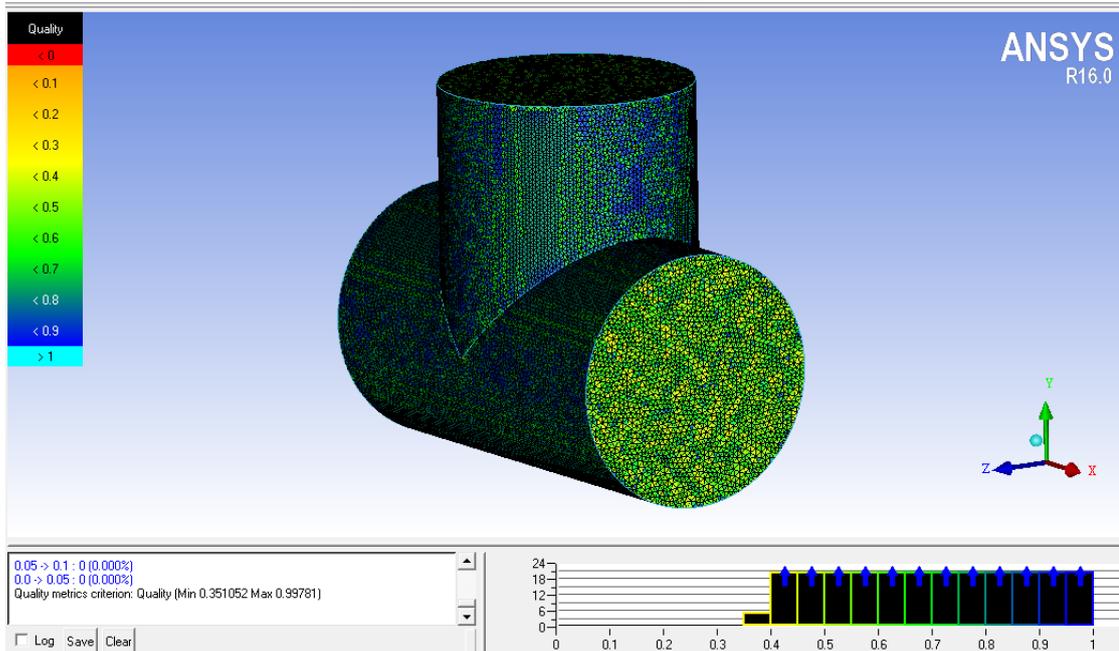
Fuente: Autor

Figura 26. Calidad de malla para el codo.



Fuente: Autor

Figura 27. Calidad de malla para la T



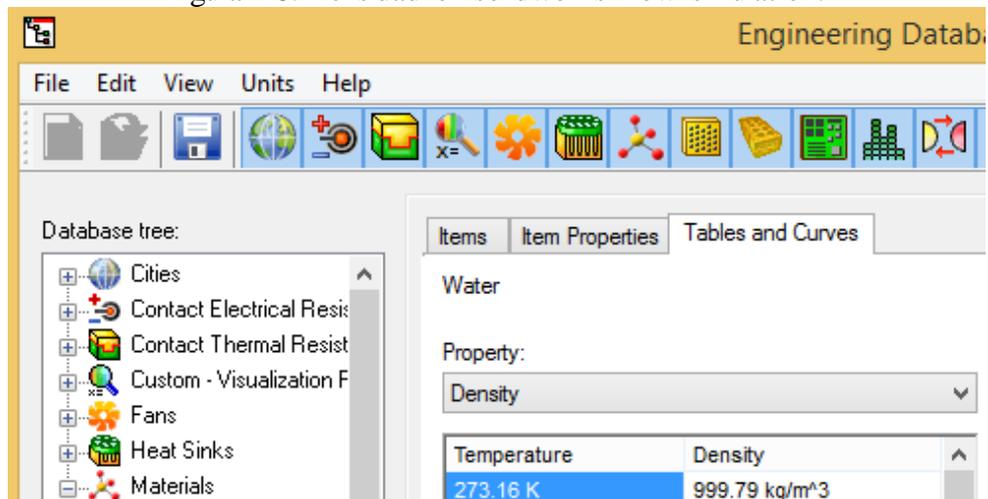
Fuente: Autor

### 4.3 Programación de campos para la solución.

Para tener los resultados más precisos y necesarios. Se tiene que saber programar bien en los comandos y especificar las condiciones del fluido, físicas, térmicas y de operación. Los resultados obtenidos dependerán mucho de estas condiciones, en esta sección se tratará de ilustrar como se debe ingresar los datos.

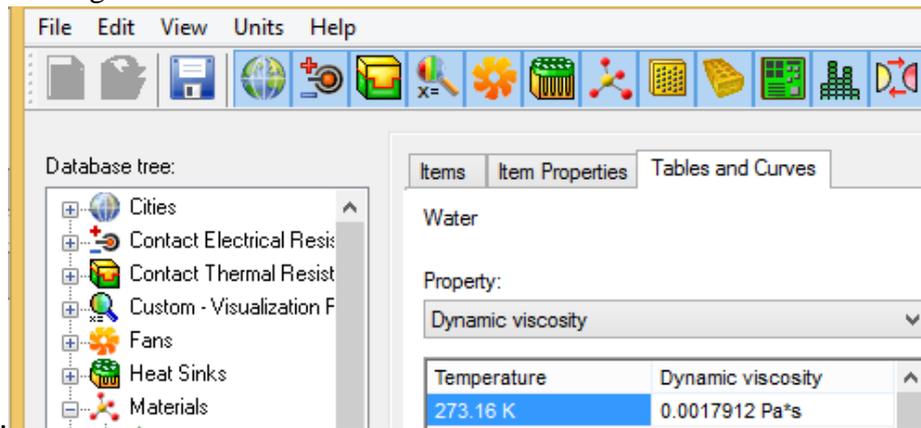
#### 4.3.1 Propiedades del fluido.

Figura 28. Densidad en solidworks flow simulation.



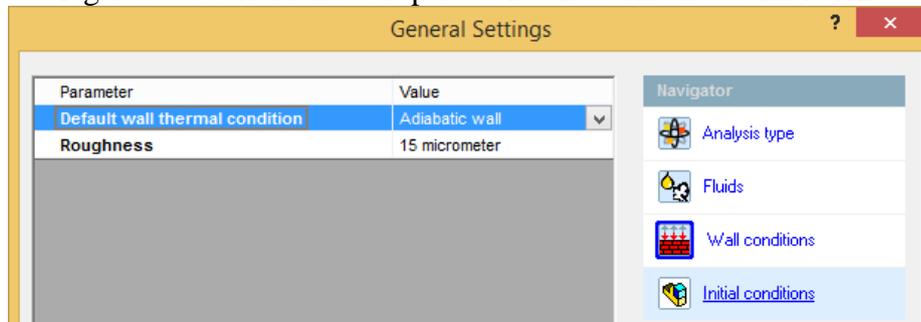
Fuente: Autor

Figura 29. Viscosidad dinámica en solidworks flow simulation



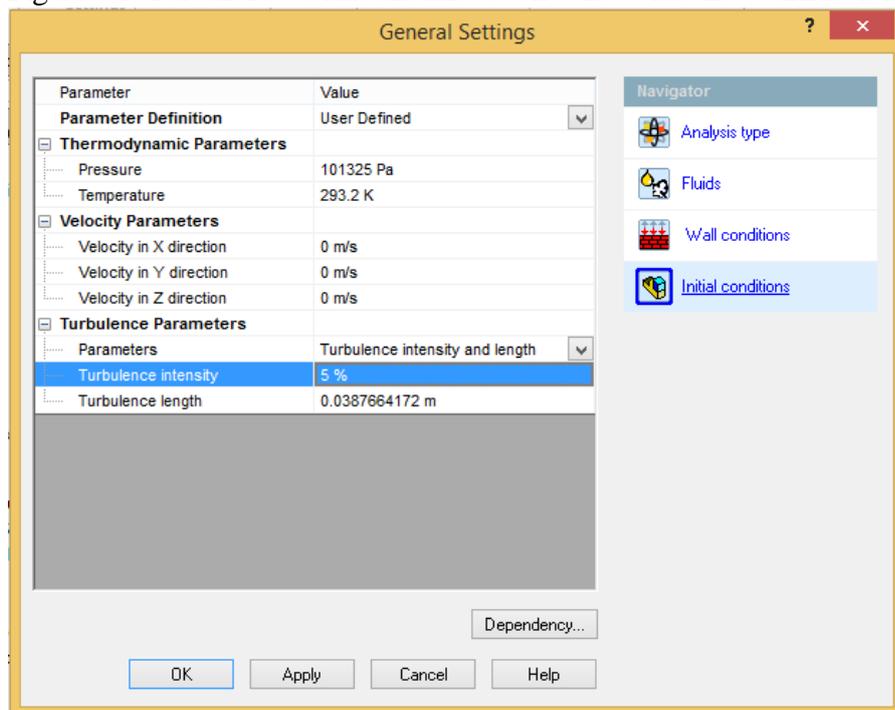
Fuente: Autor

Figura 30. Condición de la pared en solidworks flow simulation.



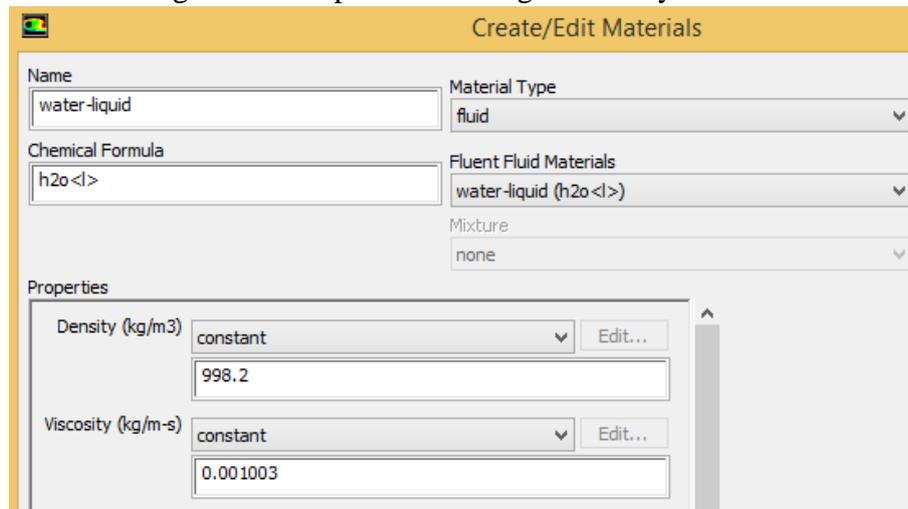
Fuente: Autor

Figura 31. Parámetros termodinámicos en solidworks flow simulation.



Fuente: Autor.

Figura 32. Propiedades del agua en Ansys Fluent.



Fuente: Autor.

**4.3.2** *Condiciones de frontera.* En este caso los datos de condición de frontera son teóricos basados en el trabajo de grado antecesor del presente trabajo. Donde tenemos la condición de no sobrepasar la presión estática del valor de 5.313 MPa. Cuando se trabaja con un flujo totalmente desarrollado y condiciones estables (la velocidad debe ser constante).

En este caso las condiciones de frontera están situadas en tres partes del accesorio, en la entrada donde se va a dar un valor de velocidad, en la salida donde se especifica que no sobre pase el valor de la presión estática es 5313600 Pa y finalmente se especificara la pared con su respectiva rugosidad del material.

Una presión estática es asumida para ser constante sobre la salida, debe tener un equilibrio radial en la distribución de presión.

Para la determinación de los parámetros turbulentos. Los valores de los límites se requiere para:

- Turbulencia de energía cinética  $k$ .
- Turbulencia de la disipación del valor de  $\epsilon$ .

Existen cuatro métodos disponibles para determinar los parámetros de turbulencia.

- K y  $\epsilon$  explícitos.
- Intensidad de turbulencia y escala de longitud turbulenta.
- Intensidad de turbulencia y turbulencia de viscosidad de radio.
- Intensidad de turbulencia y diámetro hidráulico.

**4.3.2.1** *Intensidad de turbulencia.* La intensidad y longitud de escala dependen de las condiciones de aguas arriba. En un flujo completamente desarrollado en un ducto cerrado o tubería.

$$I = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u} \quad (79)$$

Donde

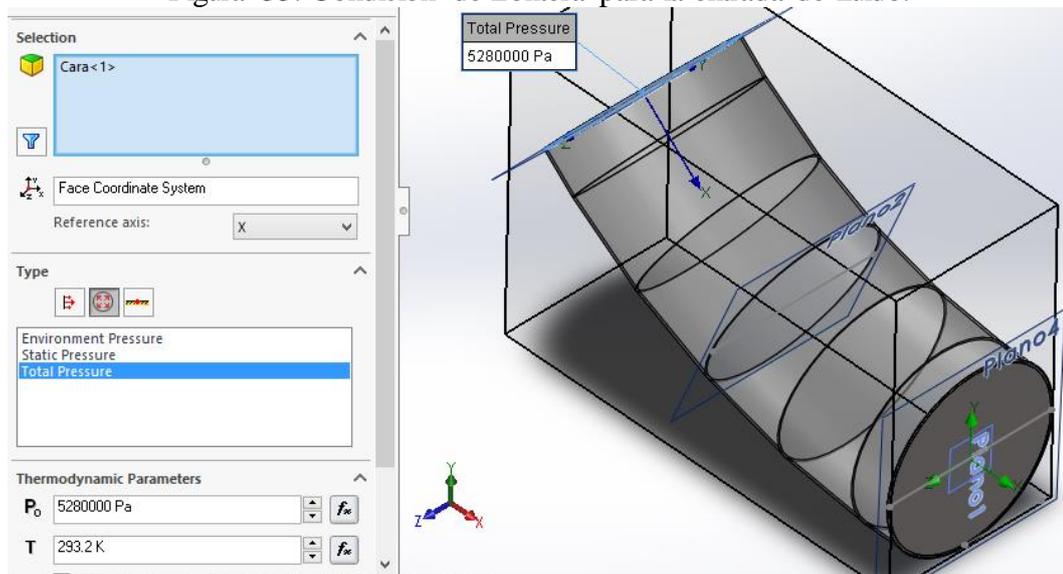
$K$ = energía cinética de turbulencia.

$u$ = es magnitud de la velocidad local,

Intensidad = 5% y la longitud de escala es igual al diámetro hidráulico. Esto sucede cuando el flujo es completamente desarrollado.

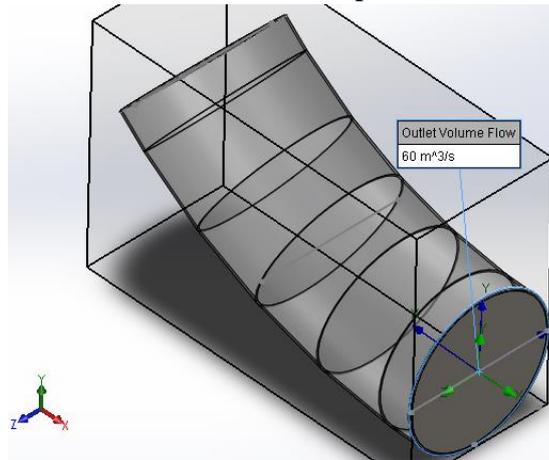
**4.3.2.2** *Condición de frontera para el codo en solidworks flow simulation.*

Figura 33. Condición de frontera para la entrada de fluido.



Fuente: Autor

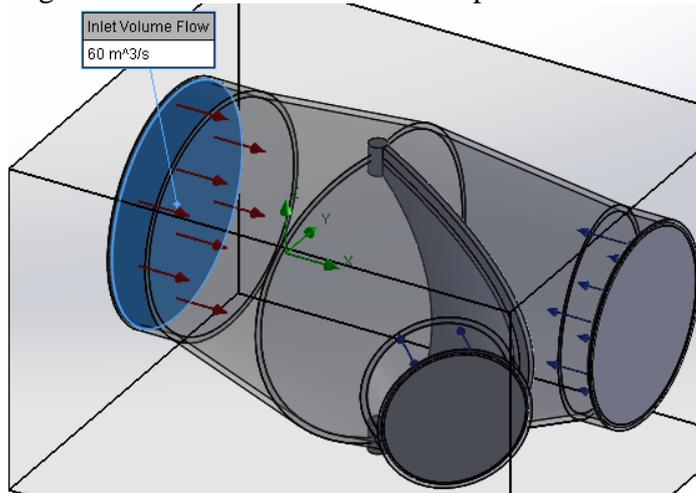
Figura 34. Condición de frontera para la salida de fluido.



Fuente: Autor

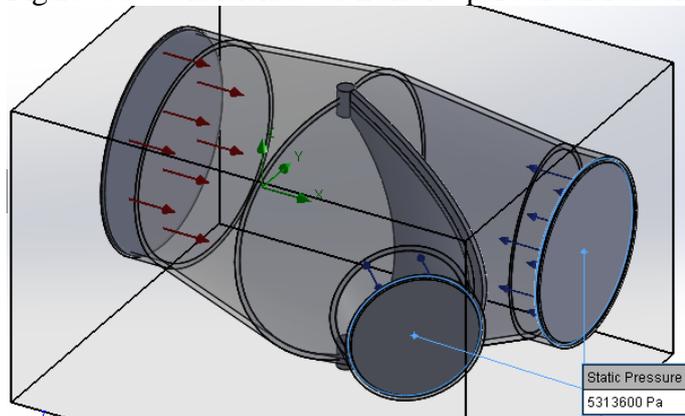
#### 4.3.2.3 Condición de frontera para el bifurcador.

Figura 35. Condiciones de frontera para el bifurcador.



Fuente. Autor

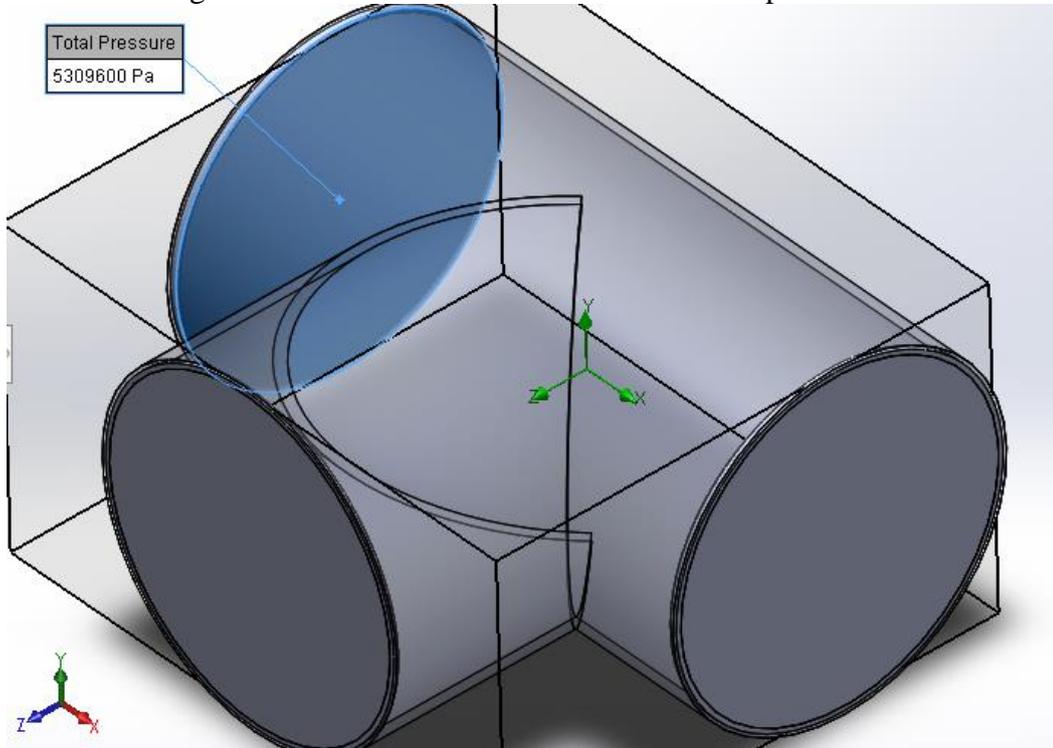
Figura 36. Condiciones de frontera para el bifurcador.



Fuente. Autor

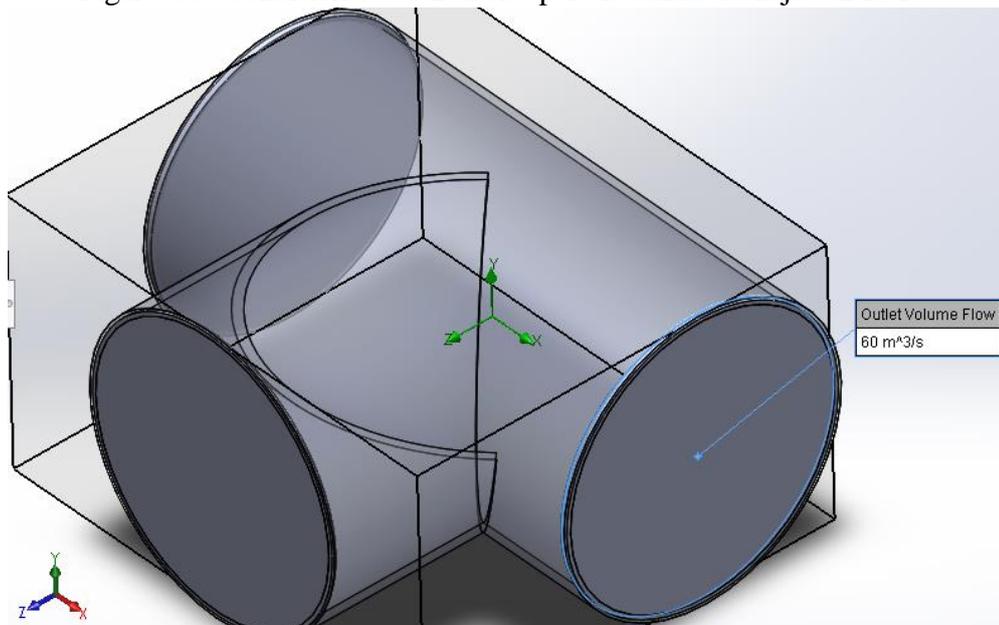
**4.3.2.4** *Condición de frontera para la Te.* La te se simulará como el accesorio instalado en el sistema de la chimenea de equilibrio.

Figura 37. Condiciones de frontera de entrada para la Te.



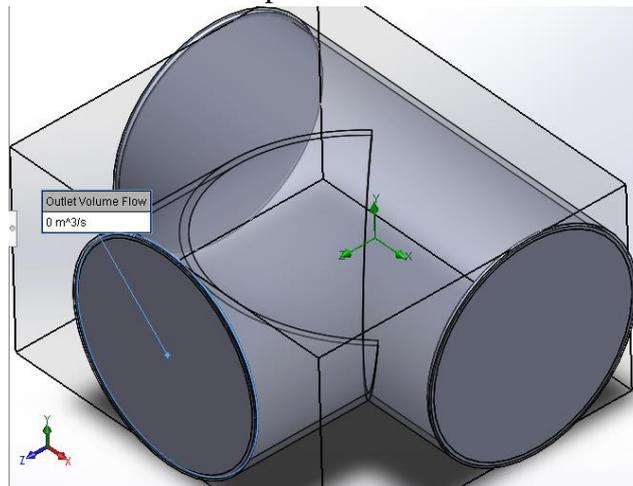
Fuente: Autor

Figura 38. Condiciones de frontera para la salida de flujo en la Te.



Fuente: Autor

Figura 39. Condiciones de frontera para la salida a la chimenea de flujo en la Te.

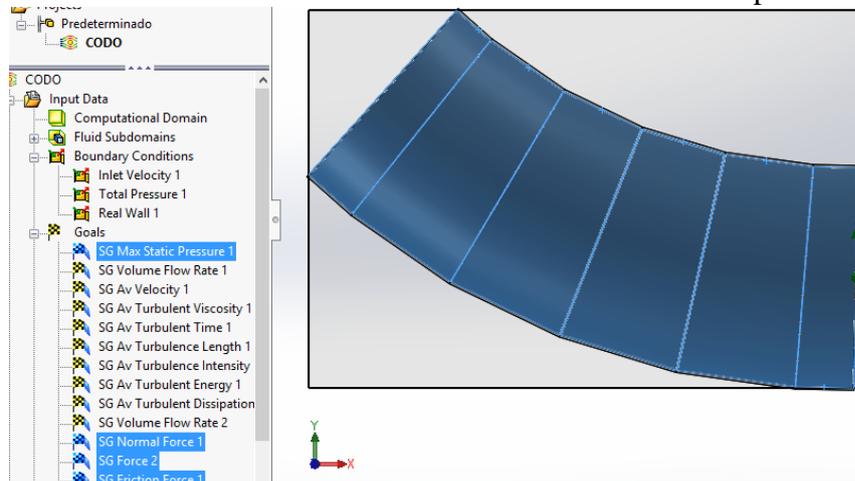


Fuente: Autor

**4.3.3 Programación de los residuos.** En esta parte por medio de activación de comandos se le pide al programa que muestre los fenómenos físicos e hidráulicos en las partes donde se necesita observar. Además esto sirve para convalidar con los datos de entrada (condiciones de frontera).

**4.3.3.1 Programación de los residuos en Solidworks Flow Simulation.** En este caso se va a programar los valores que de los fenómenos físicos en las áreas de los accesorios. Es necesario especificar que las áreas de entrada y salida del fluido son imaginarias donde se puede hallar datos solo de flujo de fluidos, y en las áreas de la pared donde se va a determinar el efecto de la presión estática provocada por el flujo de fluido. Estas áreas escogidas deben estar en contacto con el fluido.

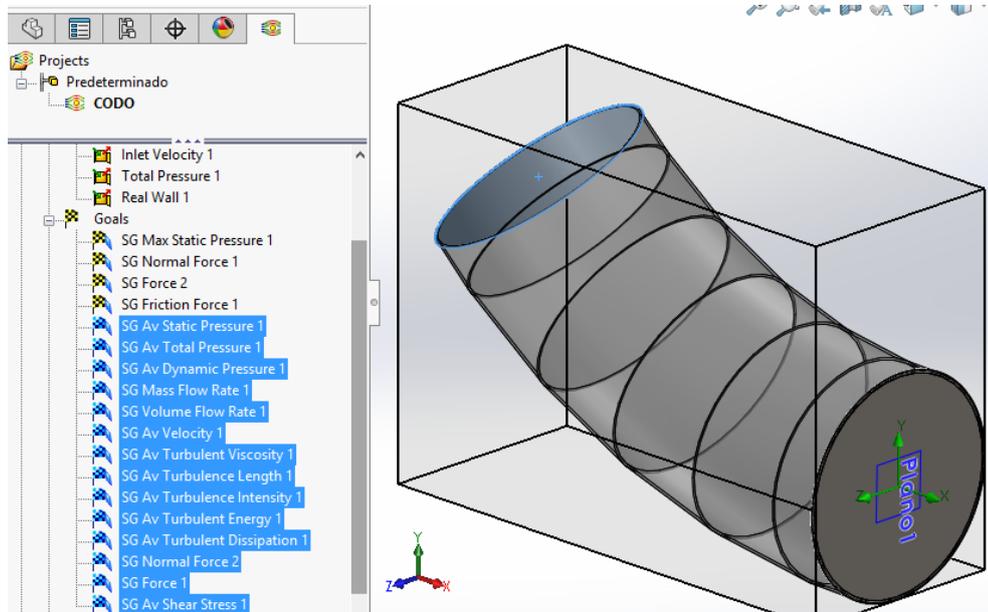
Figura 40. Áreas donde se recolecta los valores calculados en la pared del codo.



Fuente: Autor

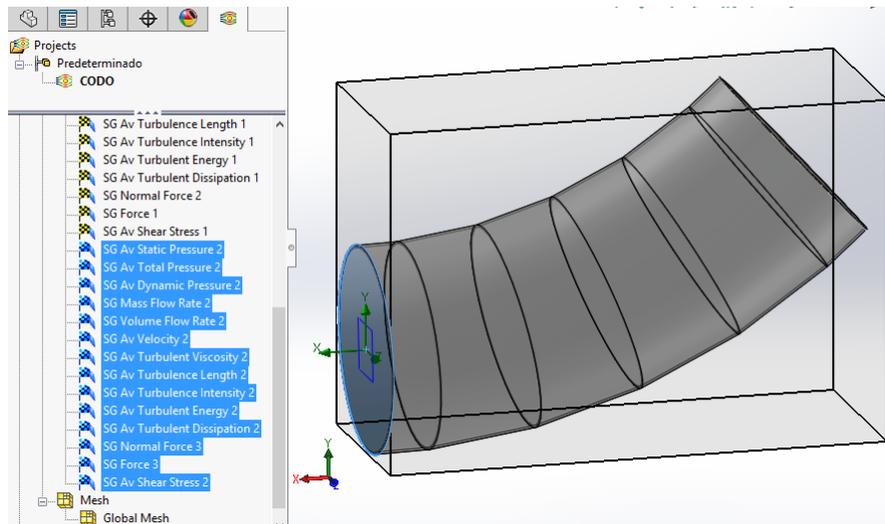
Como se puede observar en la figura los valores que se pide encontrar en la pared del codo son: Presión Estática máxima, Fuerza Normal, Fuerza y Fuerza de fricción.

Figura 41. Área donde se recolecta los valores calculados en la entrada de fluido en el codo.



Fuente: Autor

Figura 42. Área donde se recolecta los valores calculados en la salida de fluido en el codo.



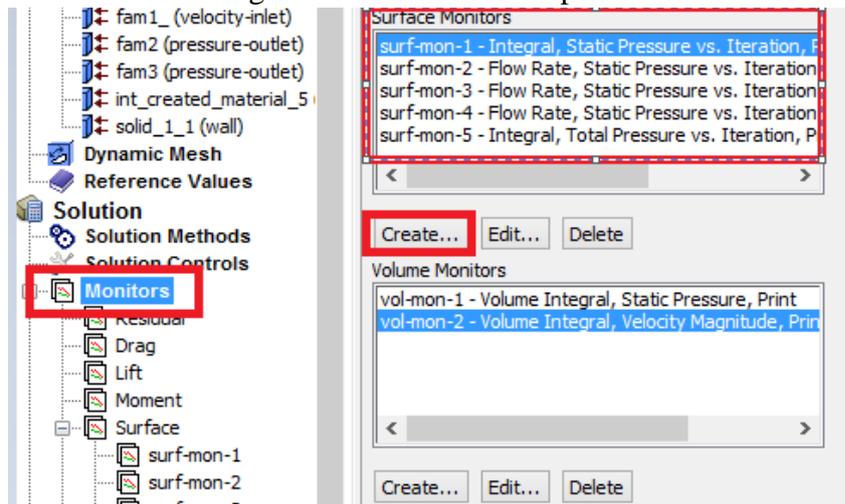
Fuente: Autor

Como se puede observar en la figura los valores promedios que se pide encontrar en la entrada y salida del flujo en el codo son: presión estática, presión total, presión dinámica, flujo másico, velocidad, viscosidad turbulenta, longitud turbulenta, intensidad

turbulenta, energía turbulenta, disipación turbulenta, fuerza normal, fuerza y esfuerzo cortante.

#### 4.3.3.2 Programación de los residuos en Ansys Fluent.

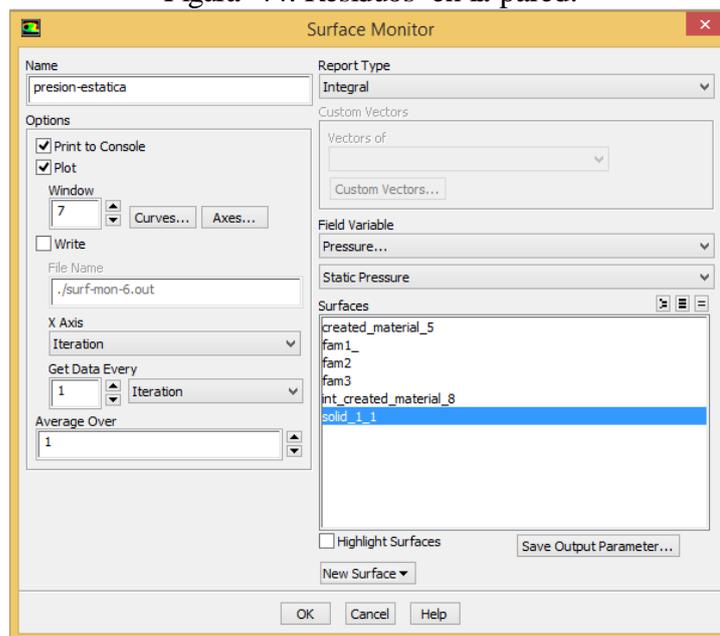
Figura 43. Residuos en la pared.



Fuente: Autor

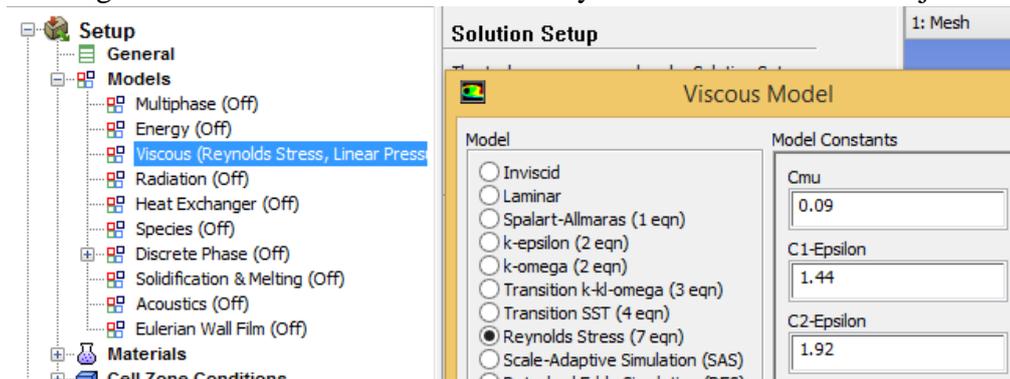
Damos clic en la parte de Monitors seguido de Create y especificamos en cada parte del accesorio. En la figura de abajo la pared esta como solid\_1\_1 y está programada para que recolecte los valores de la presión estática.

Figura 44. Residuos en la pared.



Fuente: Autor

Figura 45. Residuos de tensiones de Reynolds en la entrada del flujo.



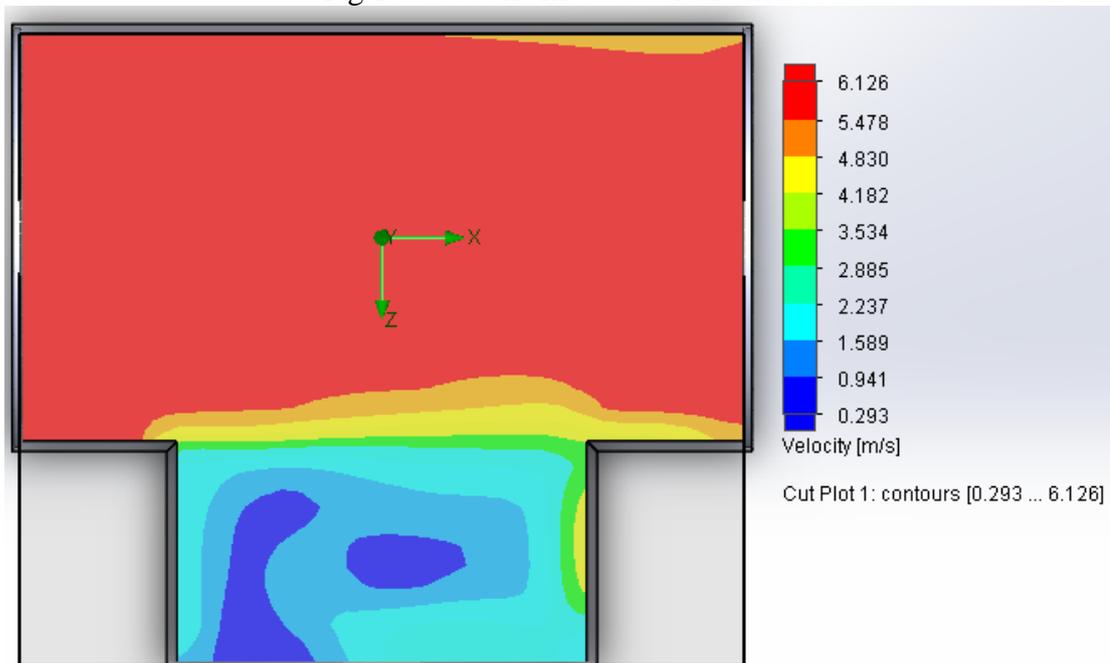
Fuente: Autor

#### 4.4 Resultados estacionarios del Análisis CFD.

Primero se simulará el flujo con una velocidad constante por lo tanto no depende del tiempo. Con esto se quiere observar los fenómenos de flujo de fluidos, los programas calcularan hasta que convergen automáticamente, para que los resultados sean confiables se debe refinar la malla lo más posible.

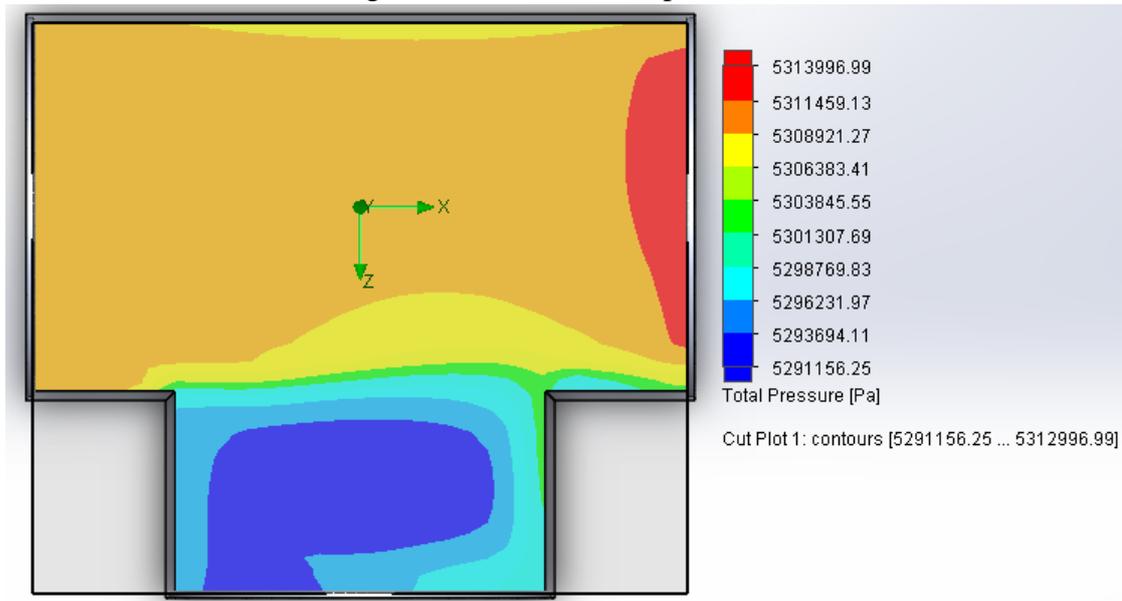
##### 4.4.1 Resultados de la te en SolidWorks Flow Simulation.

Figura 46. Contornos de velocidades.



Fuente: Autor.

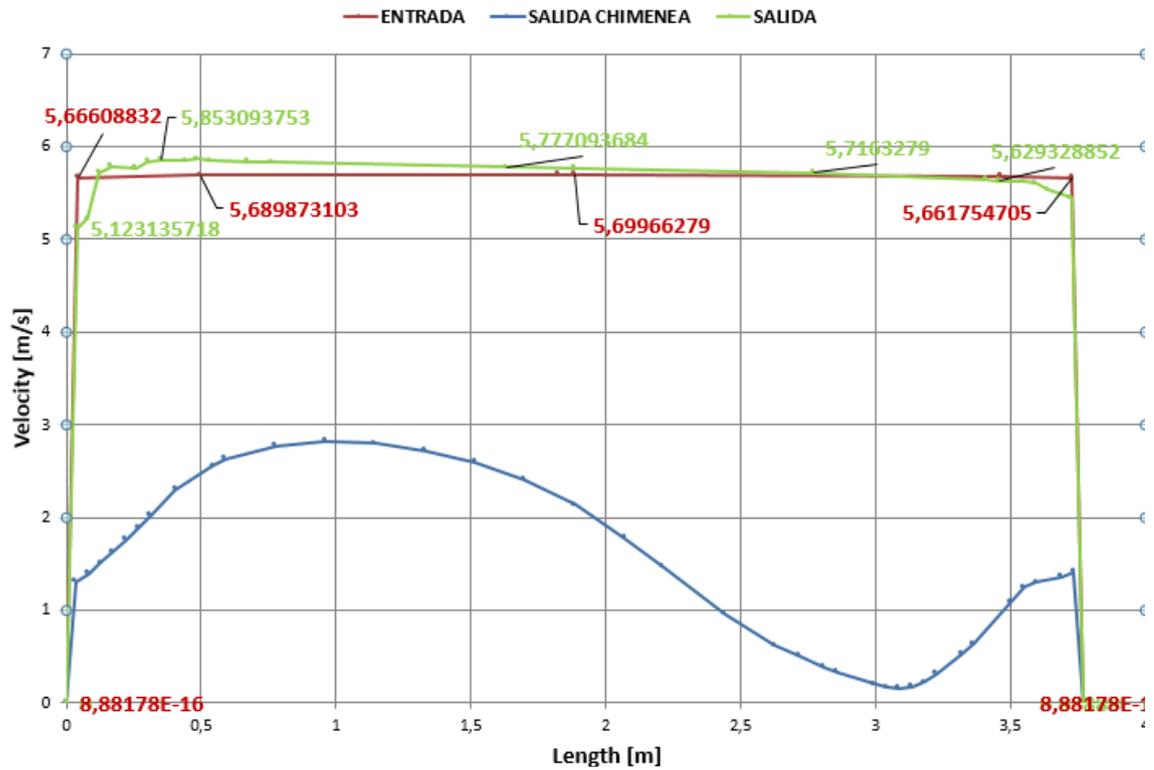
Figura 47. Contornos de presiones.



Fuente: Autor.

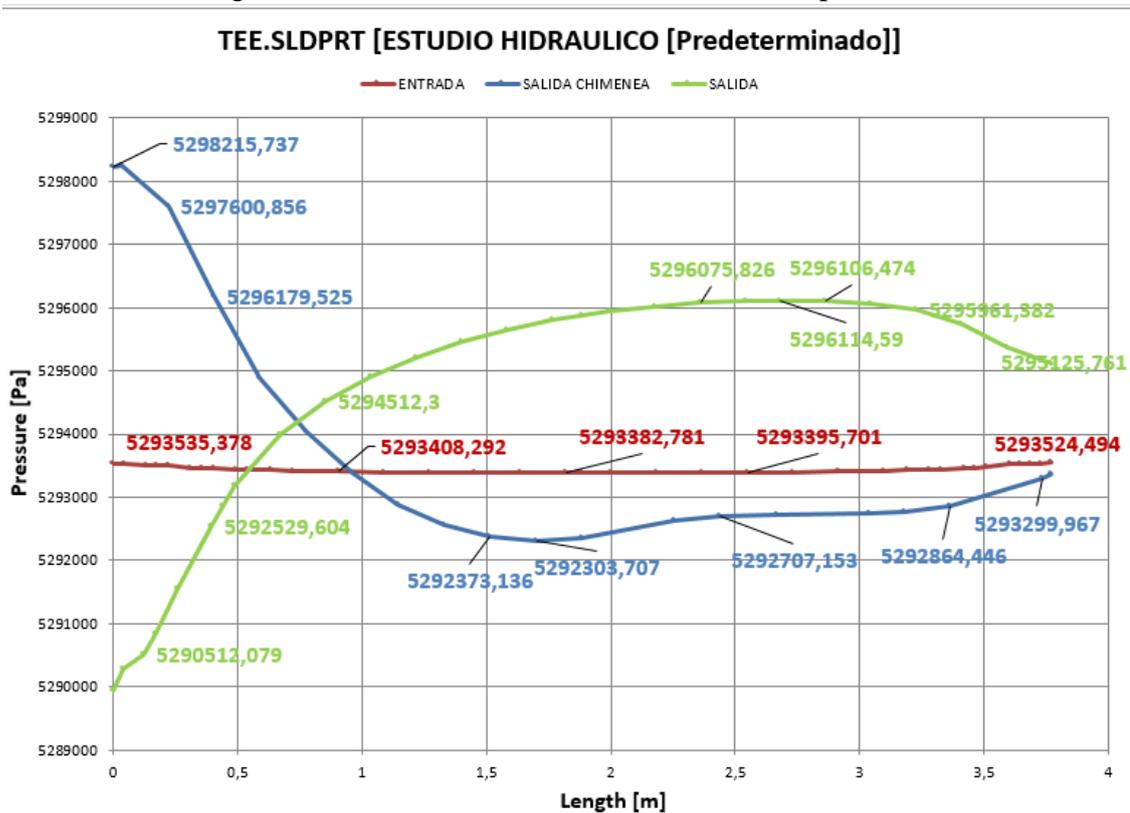
#### 4.4.2 Diagramas de perfiles

Figura 48. Ploteo de datos de la variación de la velocidad.  
TEE.SLDPRT [ESTUDIO HIDRAULICO [Predeterminado]]



Fuente: Autor.

Figura 49. Ploteo de datos de la variación de la presión l.



Fuente: Autor.

Figura 50. Comprobación de convergencia de los caudales.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Volume Flow Rate 1	[m <sup>3</sup> /s]	60.0000	60.0000	60.0000	60.0000	100	Yes
SG Volume Flow Rate 2	[m <sup>3</sup> /s]	-60.0000	-60.0000	-60.0000	-60.0000	100	Yes
SG Volume Flow Rate 3	[m <sup>3</sup> /s]	0	0	0	0	100	Yes

Fuente: Autor.

En la figura anterior SG Volume Flow Rate 1 representa al caudal de entrada, SG Volume Flow Rate 2 y SG Volumen Flow Rate 3 representa el caudal de salida. La sumatoria de los tres valores da un valor de 0.

#### 4.4.2.1 Verificación de la velocidad teórica.

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (1,885\text{m})^2 = 11,162\text{m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{60\text{m}^3/\text{s}}{11,162\text{m}^2} = 5,375\text{m/s}$$

Figura 51. Comprobación de convergencia de la velocidad en la entrada como la salida.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Av Velocity 1	[m/s]	5.408	5.408	5.407	5.408	100	Yes

Fuente: Autor.

Figura 52. Comprobación de convergencia de los valores de esfuerzos en la pared.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Normal Force 1	[N]	5.790e+007	5.790e+007	5.790e+007	5.790e+007	100	Yes
SG Force 1	[N]	5.789e+007	5.790e+007	5.789e+007	5.790e+007	100	Yes
SG Friction Force 1	[N]	4502.591	4496.747	4488.663	4502.623	100	Yes
SG Max Static Pressure 1	[Pa]	5313352.11	5313393.62	5313352.11	5313474.55	100	Yes

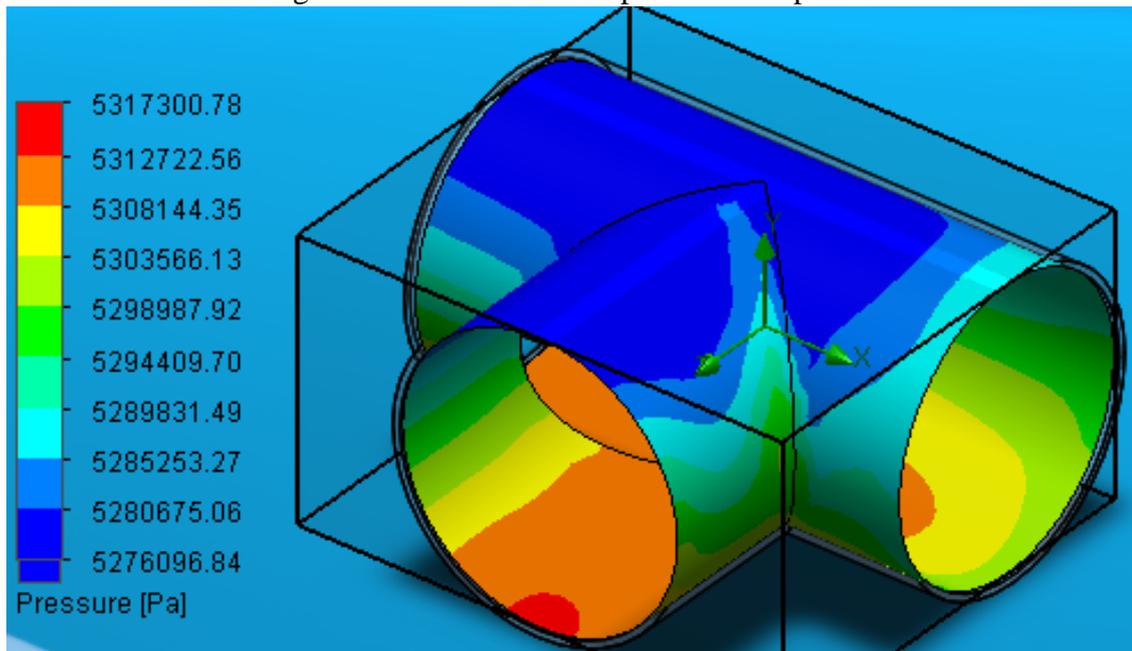
Fuente: Autor.

En la figura 52 se determina el valor de la presión estática de 5313356.11 Pa, comparando con la presión límite de 5313600Pa (Cedeño Morales, 2014), y los demás valores de la fuerza normal, fuerza y la fuerza de fricción, es también calculado en toda la pared (ver figura 38).

En la figura 54 la curva de color azul representa la velocidad de recirculación del fluido en la salida a la chimenea de equilibrio.

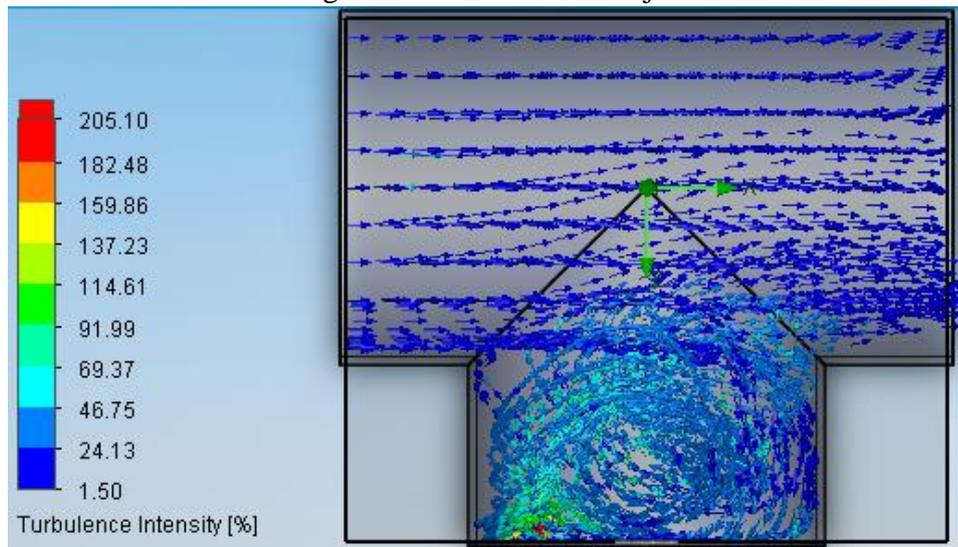
#### 4.4.3 Resultados de la te en Ansys Fluent.

Figura 53. Contornos de la presión en la pared.



Fuente: Autor.

Figura 54. Tensiones de flujo.

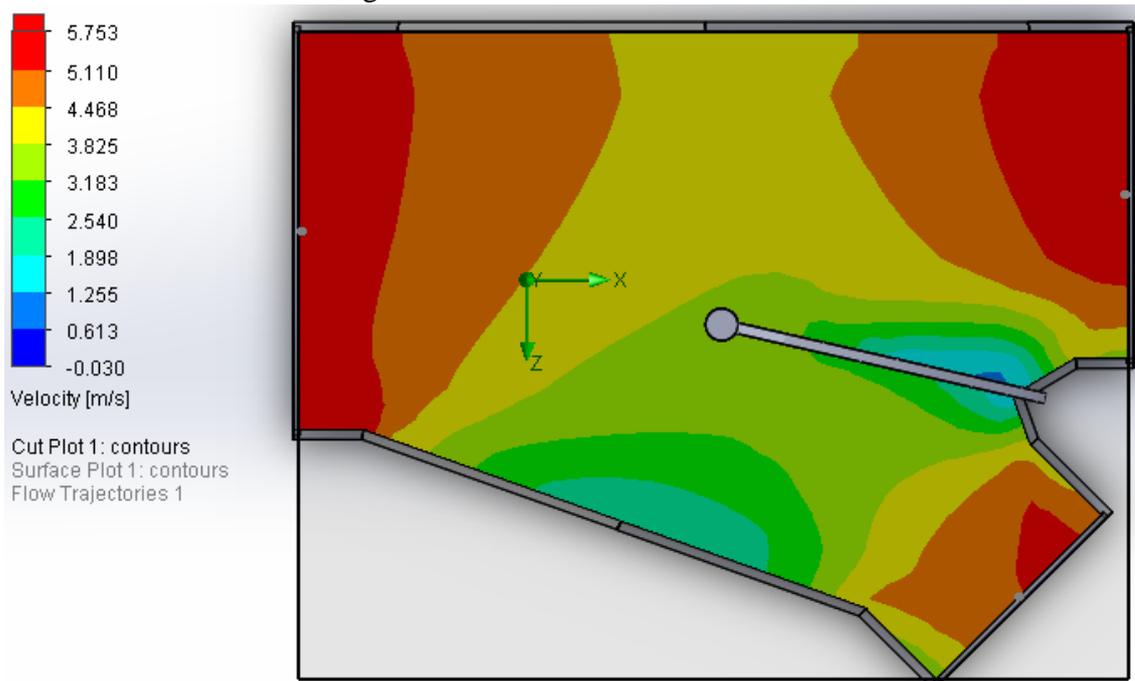


Fuente: Autor.

En la figura 53 se muestra los contornos de la presión en la pared del accesorio, en la figura 54 de se puede observar el flujo de recirculación en la parte inferior del gráfico. Esta parte es donde se conecta a la chimenea de equilibrio.

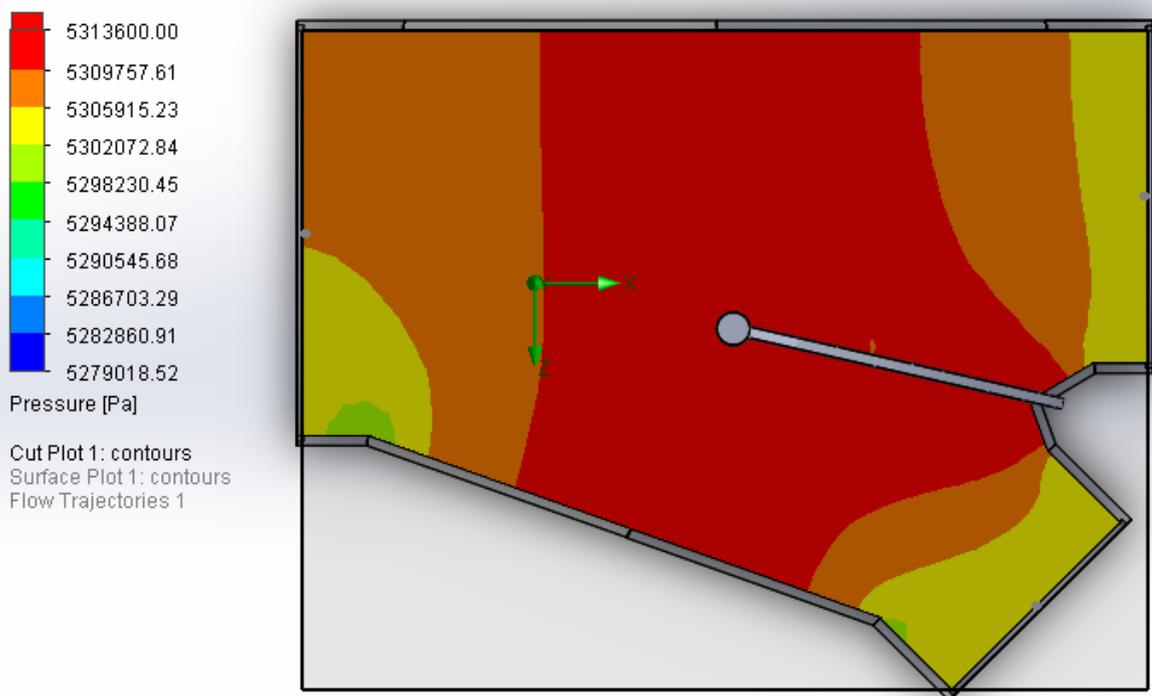
**4.4.4** *Resultados del bifurcador en SolidWorks Flow Simulation.* Primero se simulará el flujo con una velocidad constante por lo tanto no depende del tiempo.

Figura 55. Contornos de velocidades.



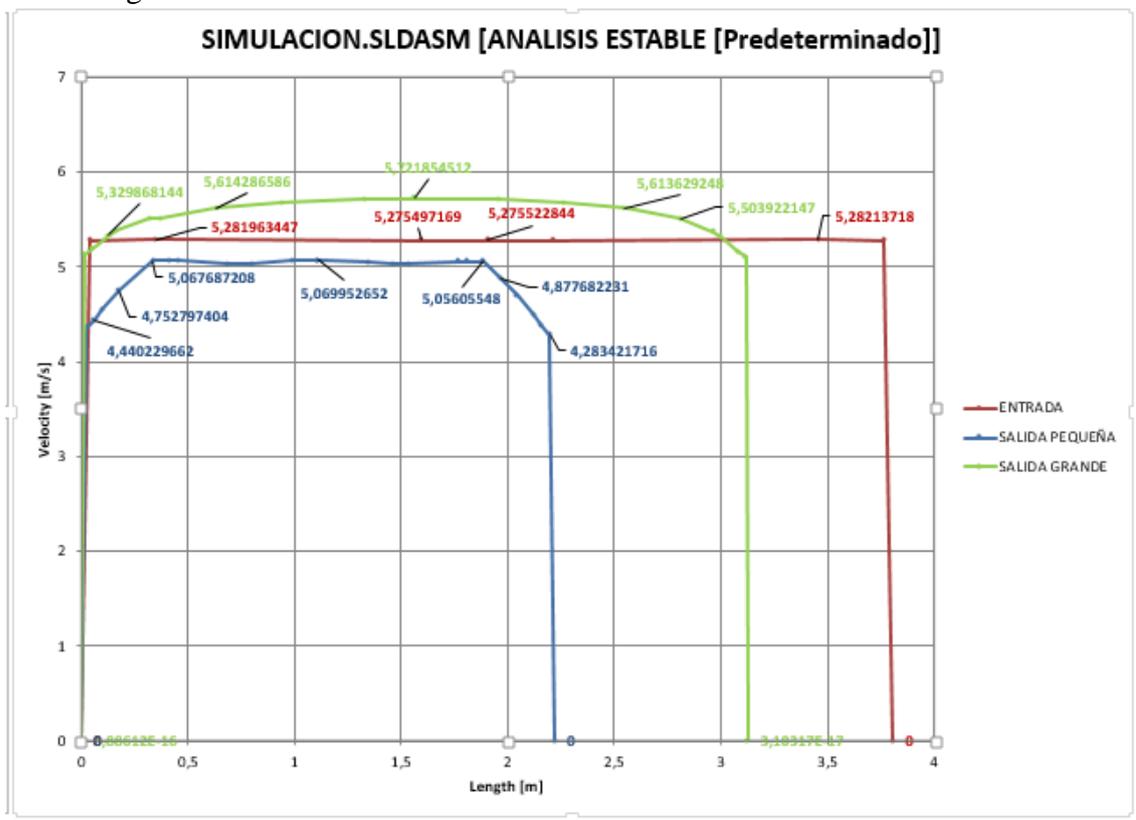
Fuente: Autor.

Figura 56. Contornos de presiones.



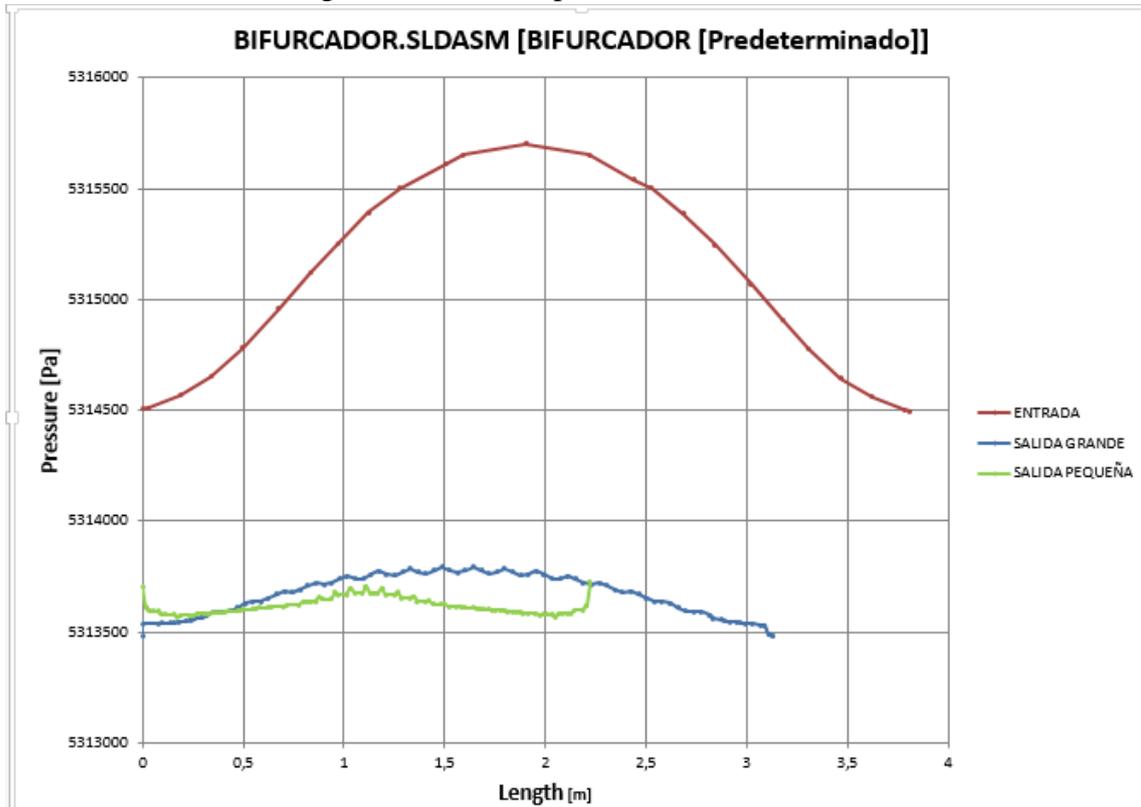
Fuente: Autor.

Figura 57. Ploteo de datos de la variación de la velocidad en el Bifurcador



Fuente: Autor.

Figura 58. Perfil de presiones en la entrada.



Fuente: Autor.

Figura 59. Comprobación de convergencia de los caudales.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Volume Flow Rate 1	[m <sup>3</sup> /s]	60.0000	60.0000	60.0000	60.0000	100	Yes
SG Volume Flow Rate 2	[m <sup>3</sup> /s]	-41.6505	-41.6525	-41.6546	-41.6499	100	Yes
SG Volume Flow Rate 3	[m <sup>3</sup> /s]	-18.3495	-18.3476	-18.3501	-18.3454	100	Yes
SG Volume Flow Rate 4	[m <sup>3</sup> /s]	-7.7789e-005	-7.0216e-005	-8.5384e-005	-5.4222e-005	100	Yes

Fuente: Autor.

En la figura anterior SG Volume Flow Rate 1 representa al caudal de entrada, SG Volume Flow Rate 2 representa el caudal de salida de la sección grande, SG Volumen Flow Rate 3 representa el caudal de salida de la sección pequeña. La sumatoria de los tres valores da un valor de error del 0.0007 es representado por Flow Rate 4.

#### 4.4.4.1 Verificación de la velocidad teórica en la entrada.

$$A = \pi * r^2 = \pi * (1,903\text{m})^2 = 11.377\text{m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{60\text{m}^3/\text{s}}{11.377\text{m}^2} = 5.273\text{m/s}$$

Figura 60. Comprobación de convergencia de la velocidad de entrada SGAvVelocity 1.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Av Velocity 1	[m/s]	5.279	5.279	5.279	5.279	100	Yes
SG Av Velocity 2	[m/s]	5.456	5.456	5.456	5.457	100	Yes
SG Av Velocity 3	[m/s]	4.760	4.759	4.759	4.760	100	Yes

Fuente: Autor.

#### 4.4.4.2 Verificación de la presión dinámica teórica en la entrada. De la ecuación (10).

$$Pd = \frac{1}{2} \rho * v^2 = \frac{1}{2} 1000 kg/m^3 * (5,273m)^2 = 13909,2 Pa$$

Figura 61. Comprobación de convergencia de la presión dinámica en la entrada SG Av Dynamic Pressure 1

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Av Total Pressure 1	[Pa]	5319243.19	5319241.39	5319235.72	5319246.88	100	Yes
SG Av Dynamic Pressure 1	[Pa]	13979.80	13979.80	13979.80	13979.80	100	Yes
SG Av Total Pressure 2	[Pa]	5319037.66	5319038.56	5319036.57	5319040.54	100	Yes
SG Av Dynamic Pressure 2	[Pa]	15037.65	15038.55	15036.56	15040.53	100	Yes
SG Av Total Pressure 3	[Pa]	5315471.50	5315471.33	5315468.01	5315474.85	100	Yes
SG Av Dynamic Pressure 3	[Pa]	11471.41	11471.25	11467.92	11474.77	100	Yes

Fuente: Autor.

Desde las figuras (60) hasta la (61) los índices 1, 2 y 3 representan a las áreas de la entrada, salida grande y de la salida pequeña respectivamente. En áreas se analizan el flujo de fluidos.

Figura 62. Comprobación de convergencia de los valores de esfuerzos en la pared.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Av Static Pressure 1	[Pa]	5318256.95	5318256.84	5318256.34	5318257.24	100	Yes
SG Normal Force 1	[N]	1.773e+007	1.773e+007	1.773e+007	1.773e+007	100	Yes
SG Force 1	[N]	1.773e+007	1.773e+007	1.773e+007	1.773e+007	100	Yes
SG Friction Force 1	[N]	3390.525	3385.642	3379.255	3390.817	100	Yes

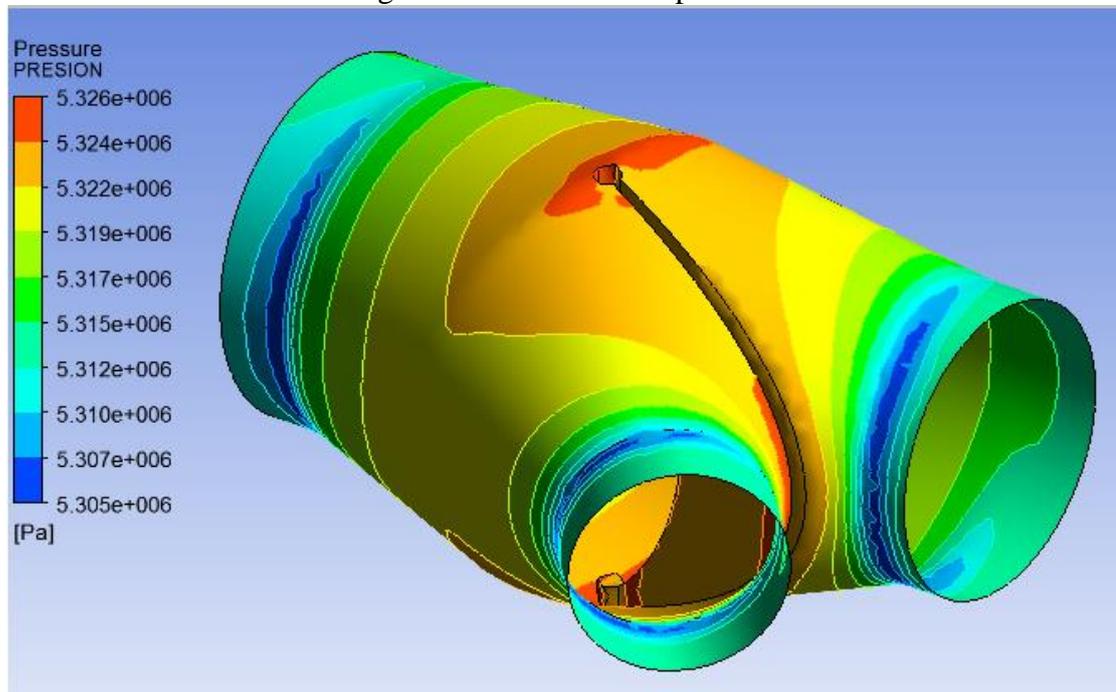
Fuente: Autor.

En la figura 62 se determina el valor de la presión estática de 5318256.56 Pa, comparando con la presión límite de 5313600Pa (Cedeño Morales, 2014), y los demás valores de la fuerza normal, fuerza y la fuerza de fricción, es también calculado en toda la pared (ver figura 38).

#### 4.4.5 Resultados del bifurcador en Ansys Fluent. Del mismo modo para los cálculos en ansys fluent, se los programa como un flujo en estado permanente de tiempo, sin

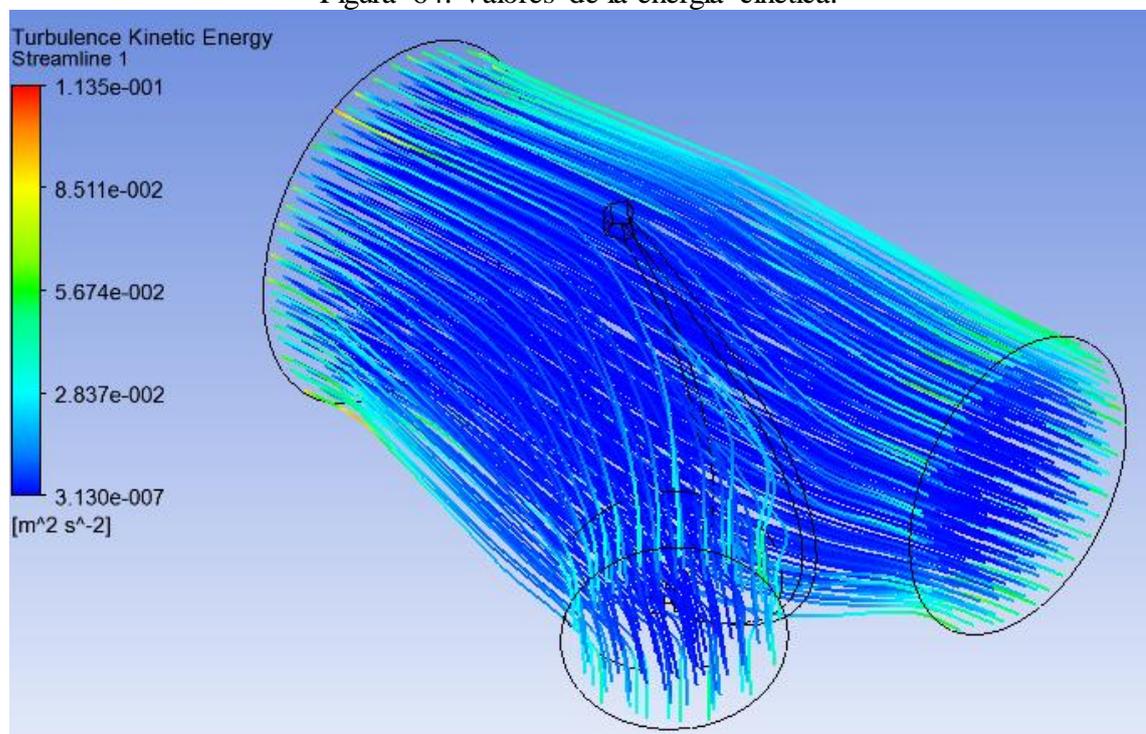
variación de la velocidad.

Figura 63. Contornos de presión.



Fuente: Autor.

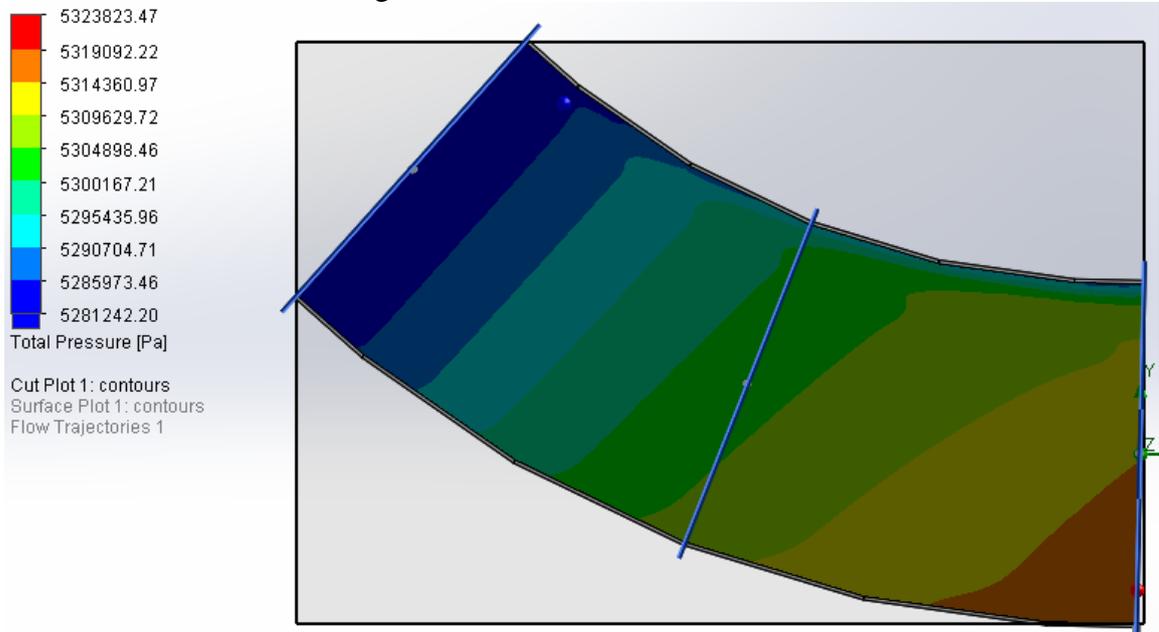
Figura 64. Valores de la energía cinética.



Fuente: Autor.

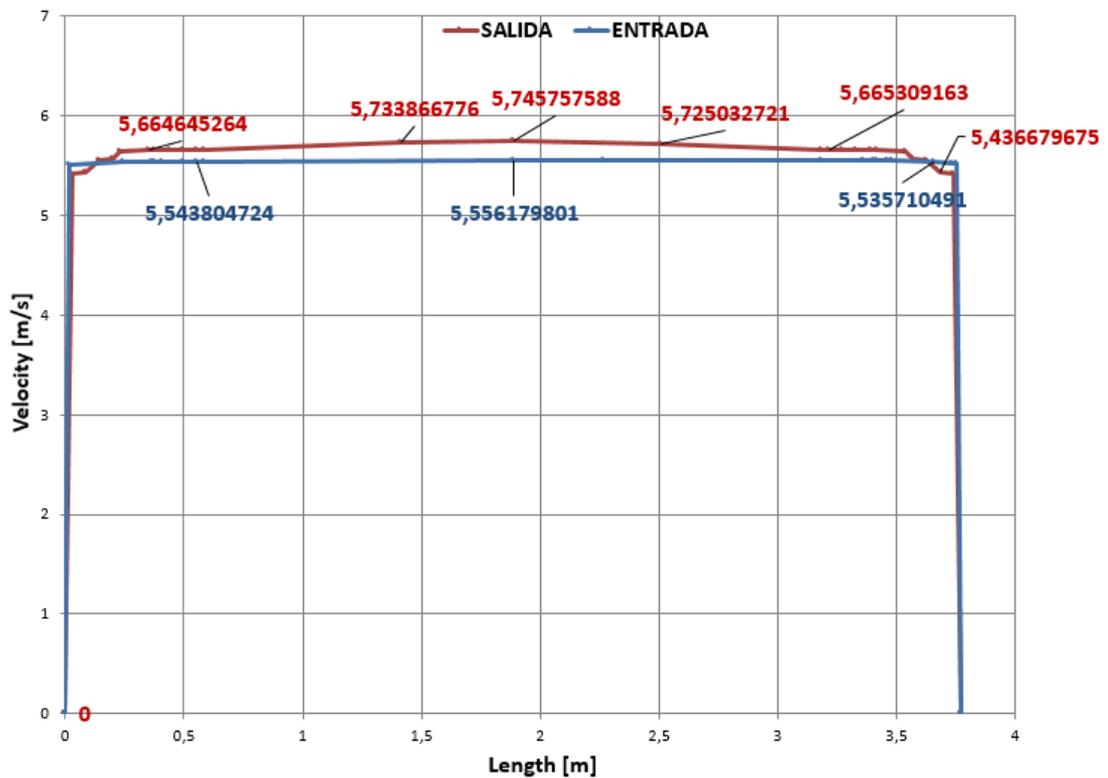
4.4.6 *Resultados del codo en SolidWorks Flow Simulation.* Primero se simulará el flujo con una velocidad constante por lo tanto no depende del tiempo.

Figura 65. Contornos de velocidad.



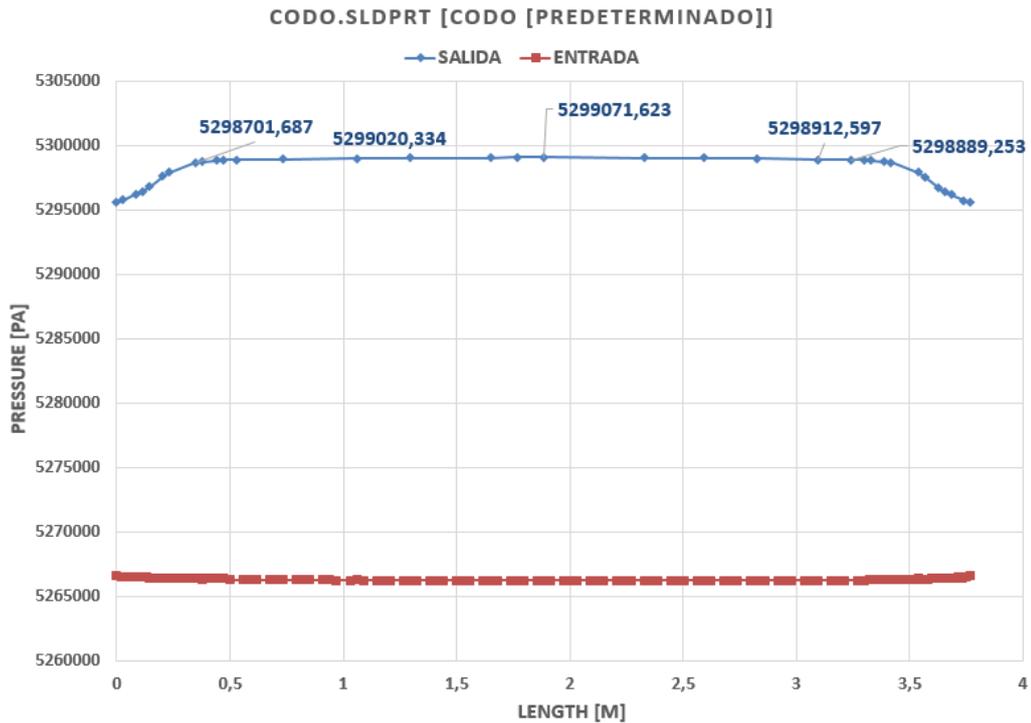
Fuente: Autor.

Figura 66. Perfil de velocidad en la entrada, mitad y salida del codo  
CODO.SLDPRT [CODO [Predeterminado]]



Fuente: Autor.

Figura 67. Perfil de presiones en la entrada y salida del codo



Fuente: Autor.

Figura 68. Comprobación de convergencia de los valores de los caudales.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Volume Flow Rate 1	[m <sup>3</sup> /s]	60.0000	60.0000	60.0000	60.0000	100	Yes
SG Volume Flow Rate 2	[m <sup>3</sup> /s]	-60.0000	-60.0000	-60.0000	-60.0000	100	Yes

Fuente: Autor.

Donde SG Volume Flow Rate 1 representa al caudal de entrada, SG Volumen Flow Rate 2 representa el caudal de salida.

#### 4.4.6.1 Verificación de la velocidad teórica en la entrada.

$$A = \pi * r^2 = \pi * (1.888m)^2 = 11.1983m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{60m^3/s}{11.1983m^2} = 5.36m/s$$

Figura 69. Comprobación de convergencia de la velocidad de entrada y salida.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Av Velocity 1	[m/s]	5.380	5.380	5.380	5.380	100	Yes

Fuente: Autor.

**4.4.6.2 Verificación de la presión dinámica teórica en la entrada.** De la ecuación (10).

$$Pd = \frac{1}{2} \rho * v^2 = \frac{1}{2} 1000 kg/m^3 * (5.36m)^2 = 14353.85Pa$$

Figura 70. Comprobación de convergencia de la presión dinámica en la entrada SG Av  
Dynamic Pressure 1

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Av Total Pressure 1	[Pa]	5280000.00	5280000.00	5280000.00	5280000.00	100	Yes
SG Av Dynamic Pressure 1	[Pa]	15900.43	15900.46	15900.38	15900.57	100	Yes

Fuente: Autor.

Figura 71. Comprobación de convergencia de los valores de esfuerzos en la pared

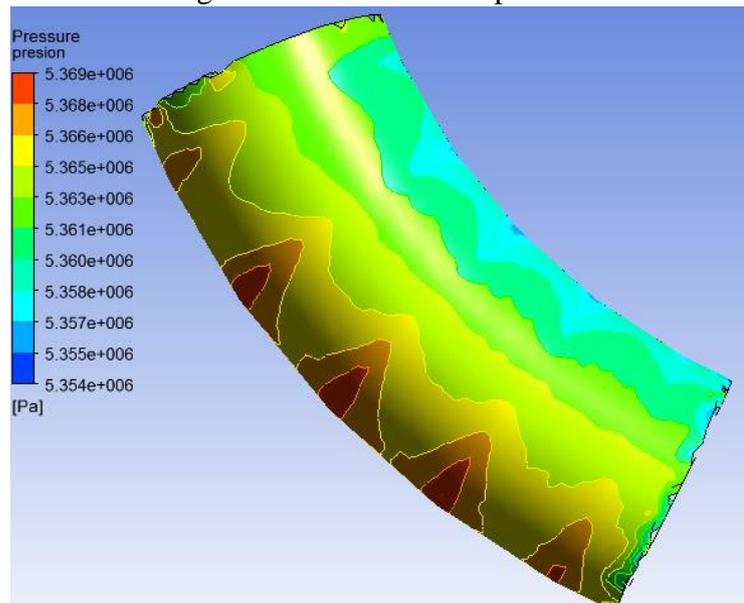
Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Max Static Pressure 1	[Pa]	5313499.05	5313499.75	5313497.75	5313501.25	100	Yes
SG Normal Force 1	[N]	4.108e+007	4.108e+007	4.108e+007	4.108e+007	100	Yes
SG Force 2	[N]	4.108e+007	4.108e+007	4.108e+007	4.108e+007	100	Yes
SG Friction Force 1	[N]	6660.486	6657.571	6651.406	6663.683	100	Yes

Fuente: Autor.

En la figura 71 se determina el valor de la presión estática de 5313499.75 Pa, se compara con la presión límite de 5313600Pa (Cedeño Morales, 2014).

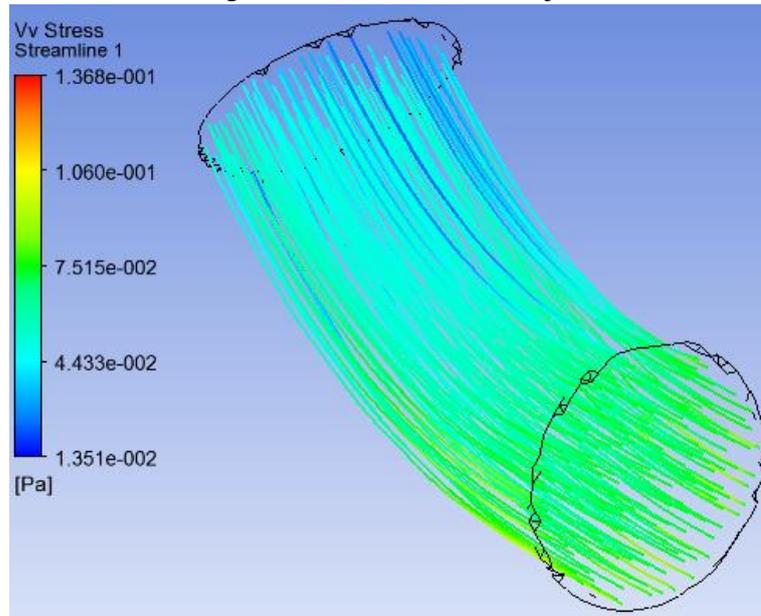
**4.4.7 Resultados del codo en Ansys Fluent.**

Figura 72. Contornos de presión.



Fuente: Autor.

Figura 73. Tensiones de flujo.



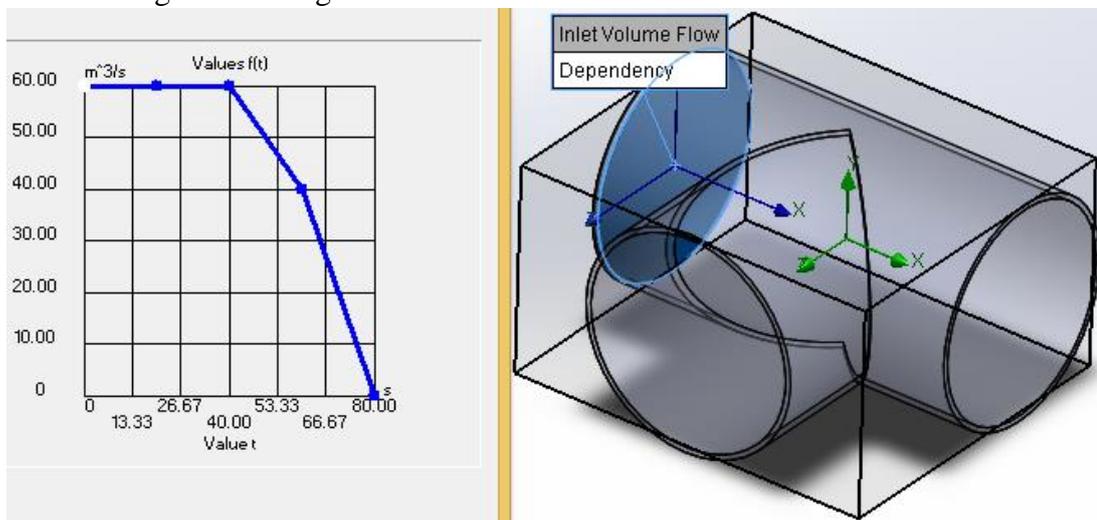
Fuente: Autor.

#### 4.5 Resultados transitorios del Análisis CFD.

En esta sección se ilustra el comportamiento del flujo de fluidos en función del tiempo, cuando se programa la velocidad desde un valor máximo hasta un valor mínimo, simulando así el golpe de ariete, esto ocurre normalmente cuando se cierra de alguna válvula.

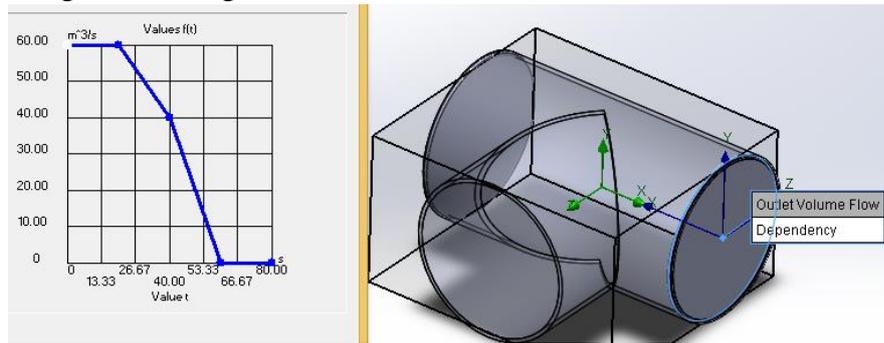
##### 4.5.1 Resultados de la te en estado transitorio.

Figura 74. Programación de la condición de frontera en la entrada.



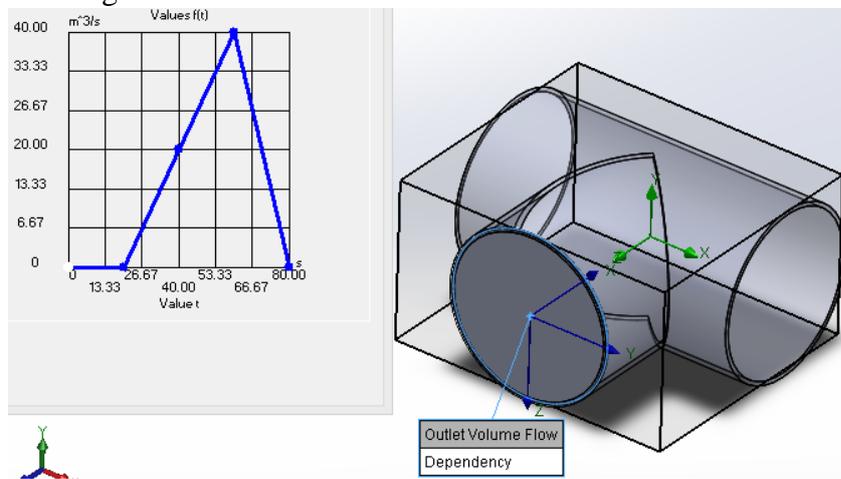
Fuente: Autor.

Figura 75. Programación de la condición de frontera en la salida.



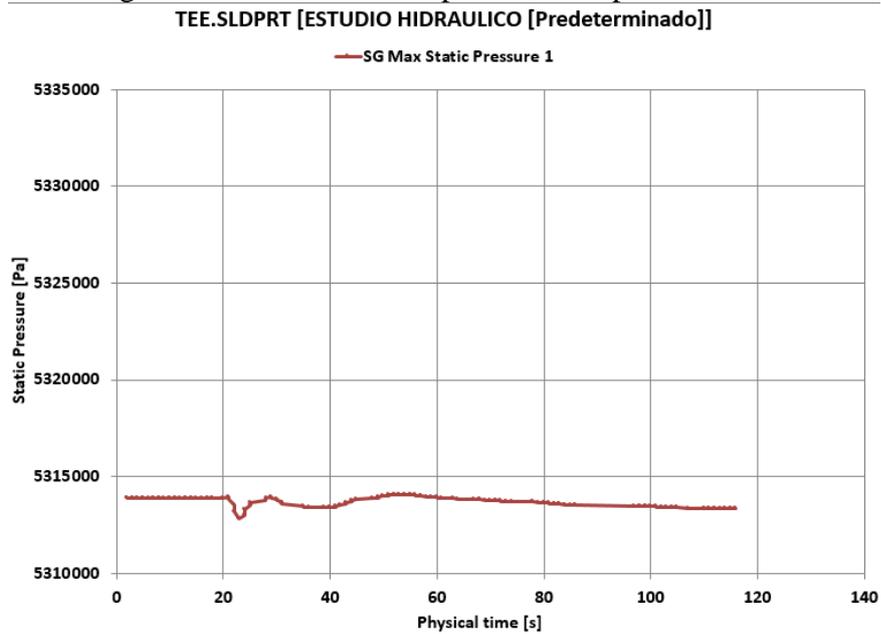
Fuente: Autor.

Figura 76. Programación de la condición de frontera en la salida de la chimenea.



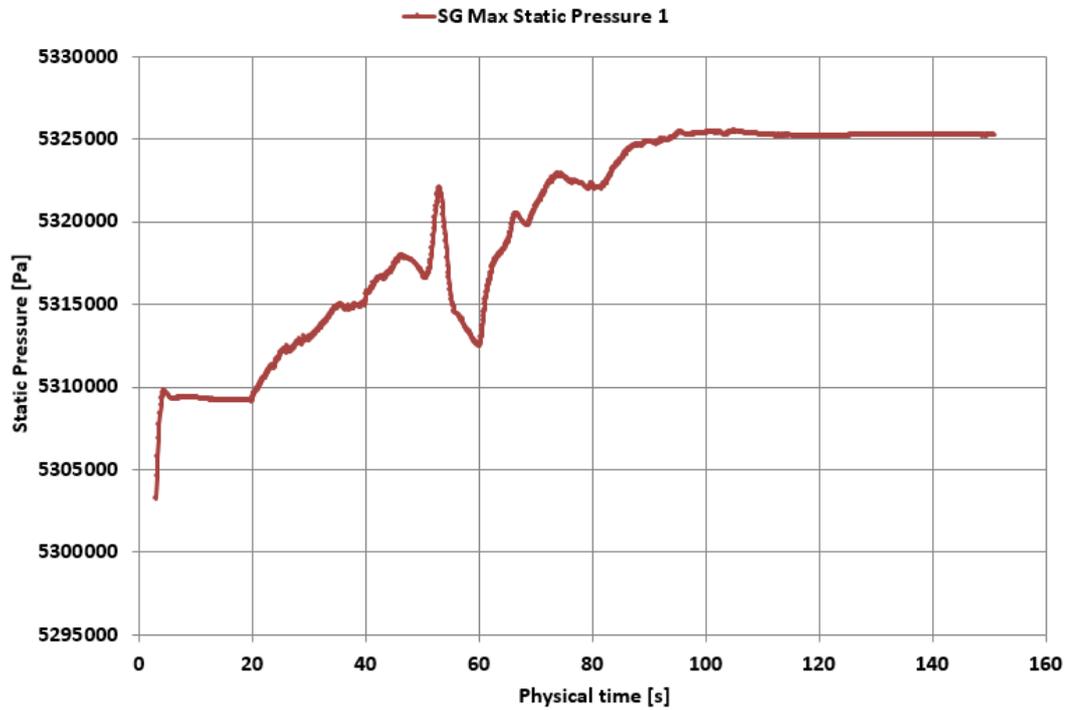
Fuente: Autor.

Figura 77. Variación de la presión en la pared de la te.



Fuente: Autor.

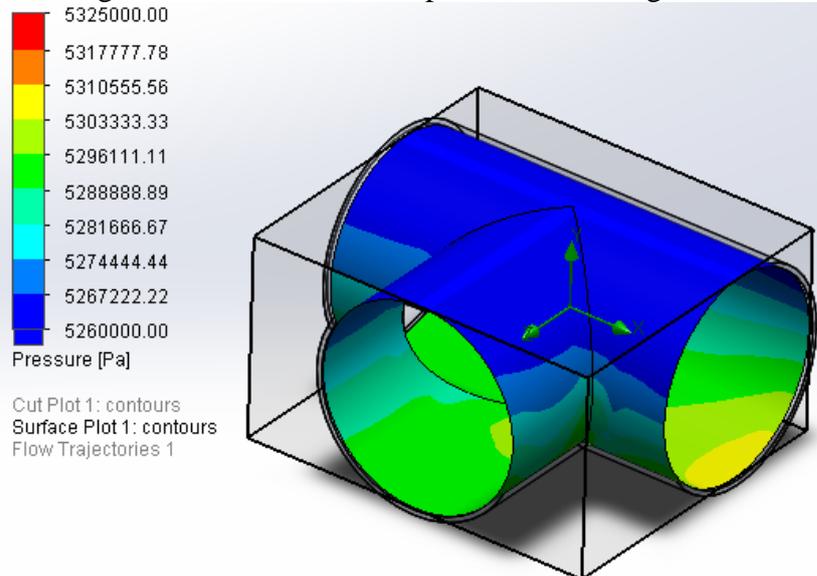
Figura 78. Variación de la presión en la pared de la te.  
**TEE.SLDPRT [Golpe de Ariete [Predeterminado]]**



Fuente: Autor.

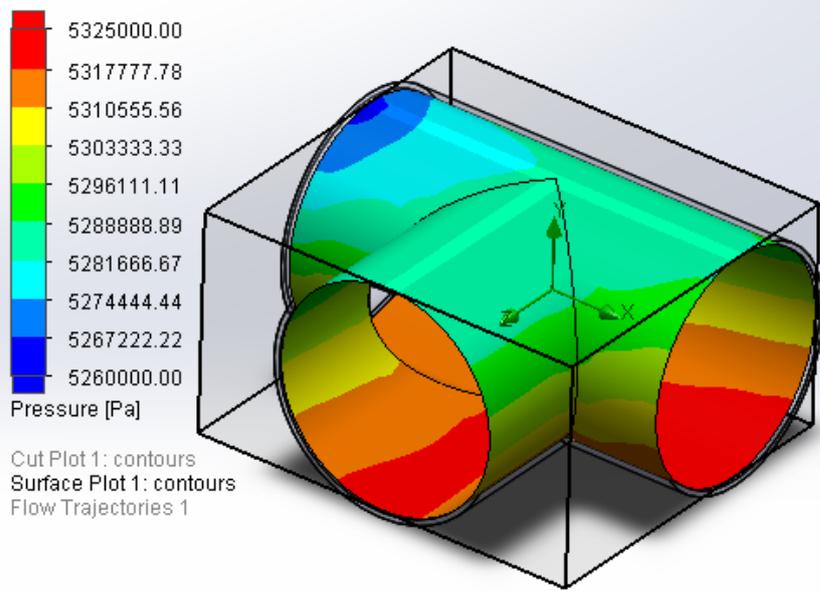
En la curva de la figura (79) se puede observar que hasta aproximadamente 5 segundos es un tiempo de estadidad de cálculo, desde los 5 segundos has los 20 segundos es un tiempo de cálculo estacionario partir de los 20 segundos se comenzó a variar los caudales, como se muestra desde la figura (77) hasta la (78).

Figura 79. Contornos de la presión a los 5 segundos.



Fuente: Autor.

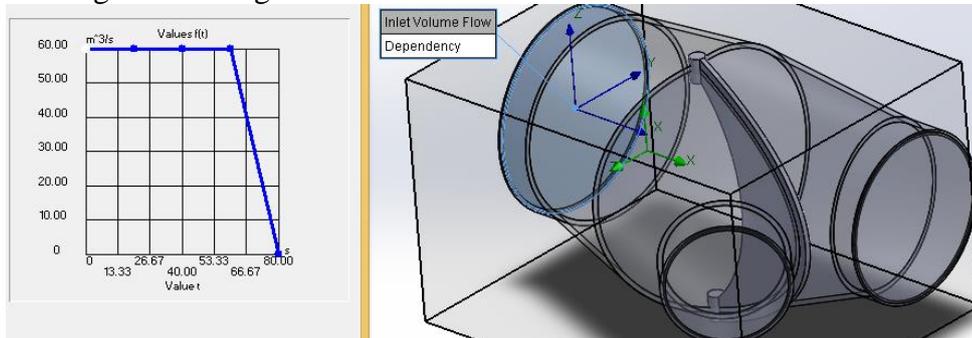
Figura 80. Contornos de la presión a los 120 segundos.



Fuente: Autor.

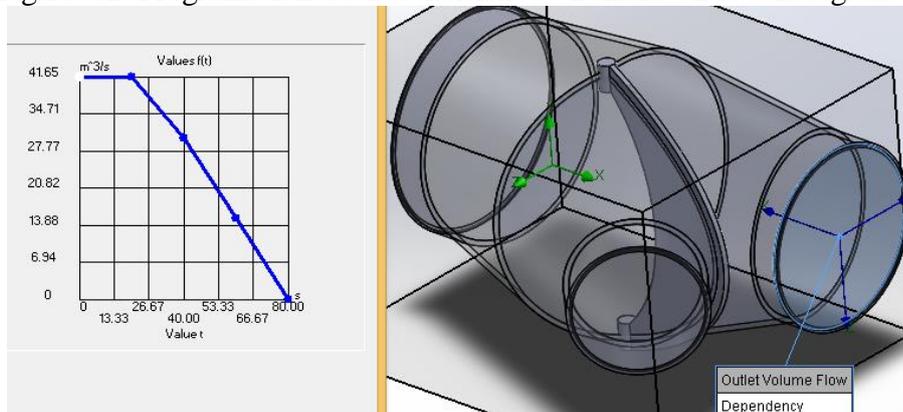
#### 4.5.2 Resultados del bifurcador en estado transitorio.

Figura 81. Programación de la condición de frontera en la entrada.



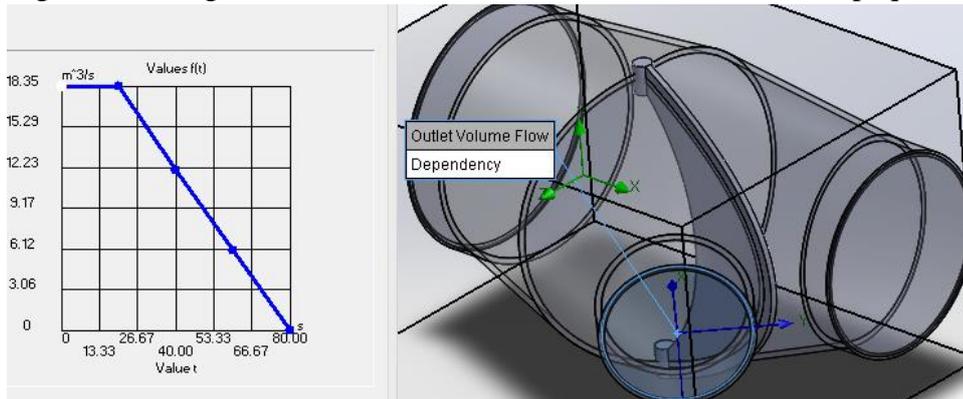
Fuente: Autor.

Figura 82. Programación de la condición de frontera en la salida grande.



Fuente: Autor.

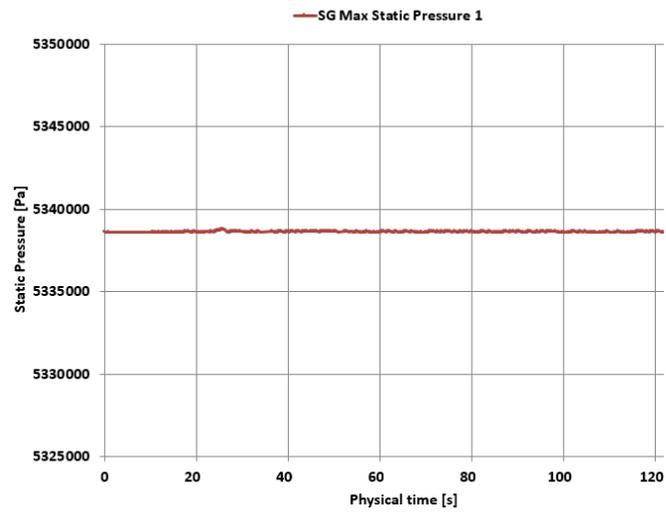
Figura 83. Programación de la condición de frontera en la salida pequeña.



Fuente: Autor.

Figura 84. Variación de la presión en la pared en el bifurcador.

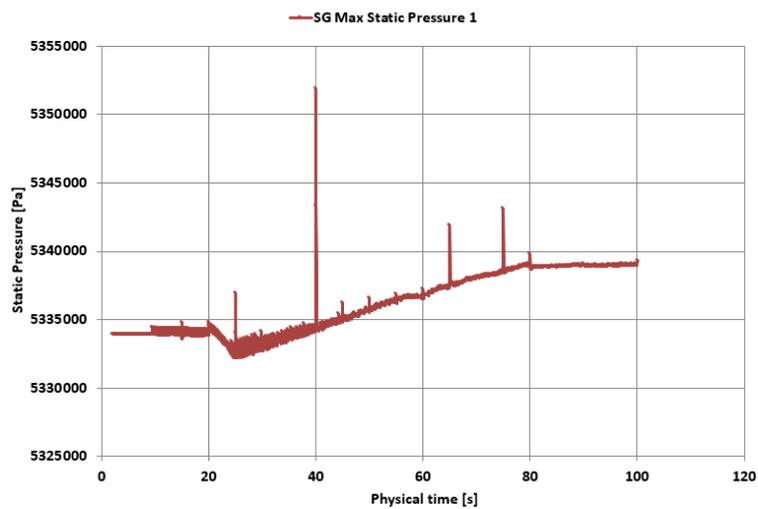
SIMULACION.SLDASM [ANÁLISIS ESTABLE [Predeterminado]]



Fuente: Autor.

Figura 85. Variación de la presión en la pared en el bifurcador.

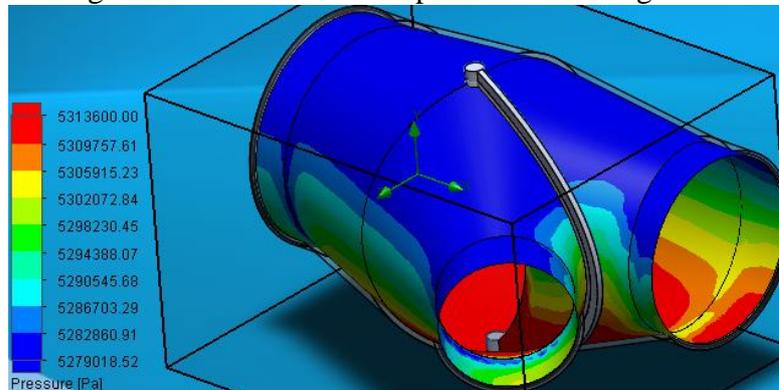
SIMULACION.SLDASM [GOLPE DE ARIETE [Predeterminado]]



Fuente: Autor.

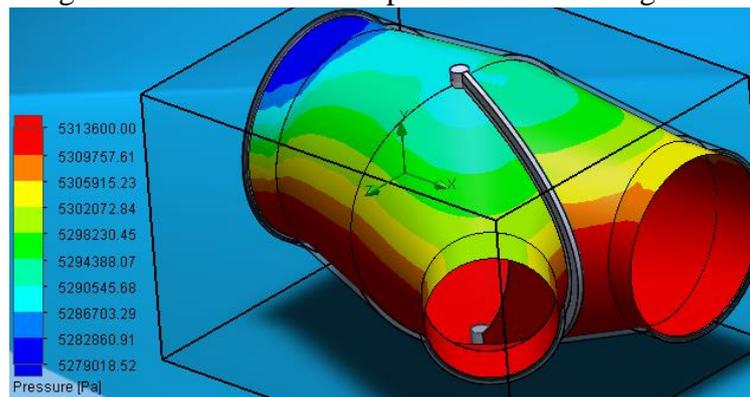
En la curva de la figura (85) se puede observar que a los 40 segundos existe el pico más alto. Y comienza a estabilizarse a partir de los 80 segundos

Figura 86. Contornos de la presión a los 5 segundos.



Fuente: Autor.

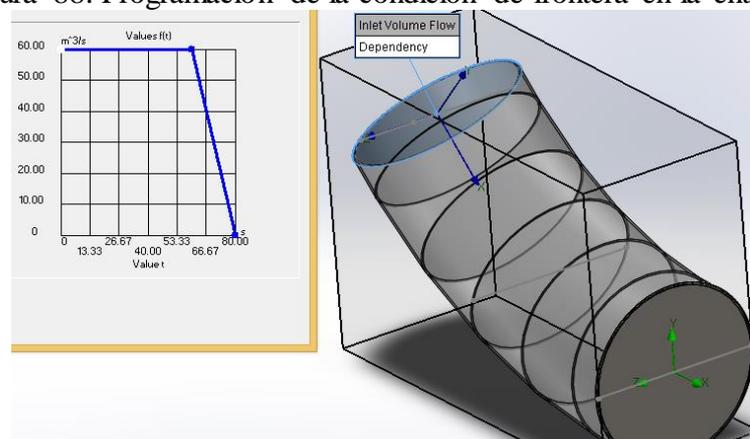
Figura 87. Contornos de la presión a los 100 segundos.



Fuente: Autor.

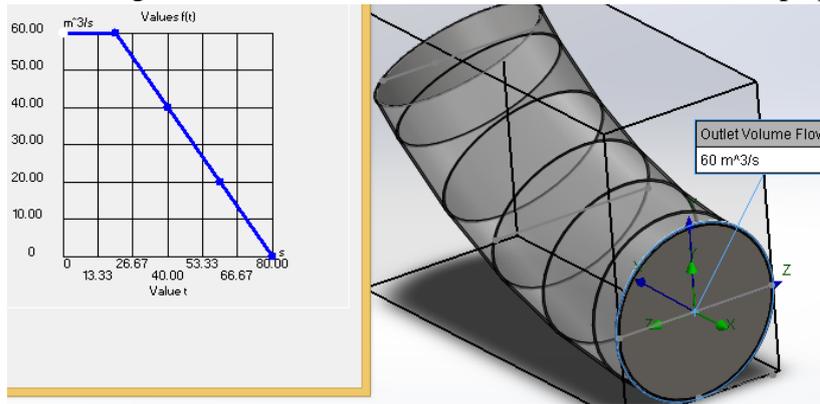
#### 4.5.3 Resultados del codo en estado transitorio.

Figura 88. Programación de la condición de frontera en la entrada.



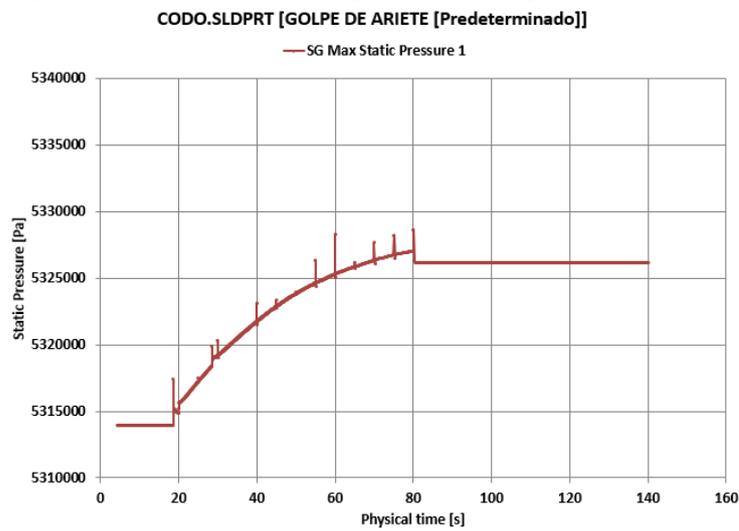
Fuente: Autor.

Figura 89. Programación de la condición de frontera en la salida pequeña.



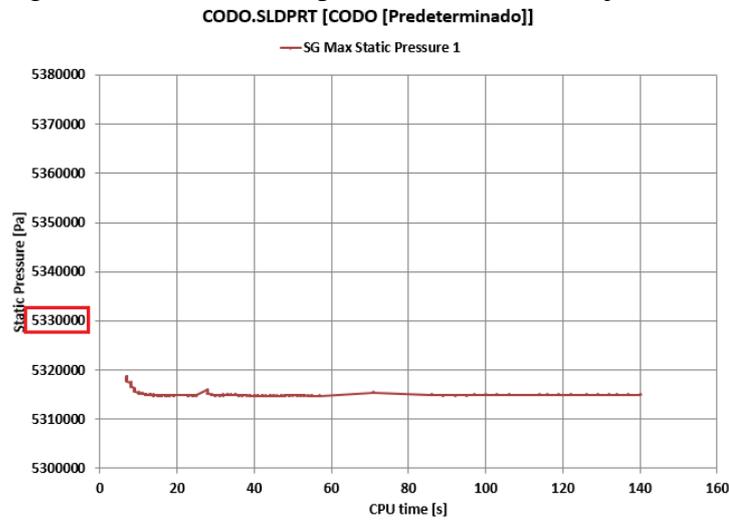
Fuente: Autor.

Figura 90. Variación de la presión en la pared en el codo.



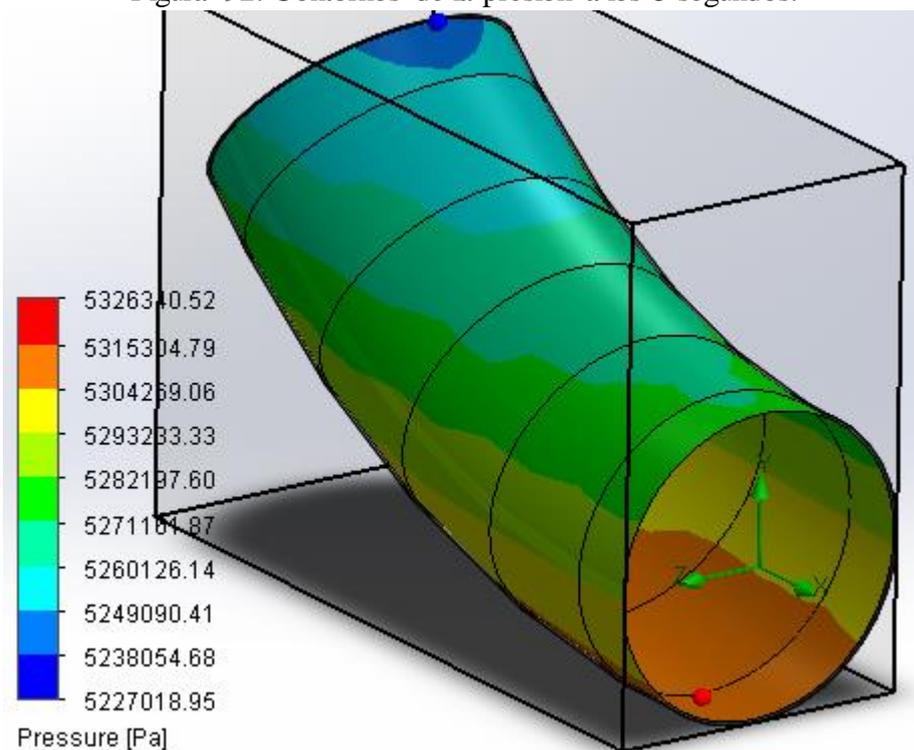
Fuente: Autor.

Figura 91. Presión en la pared en el codo en flujo estable.



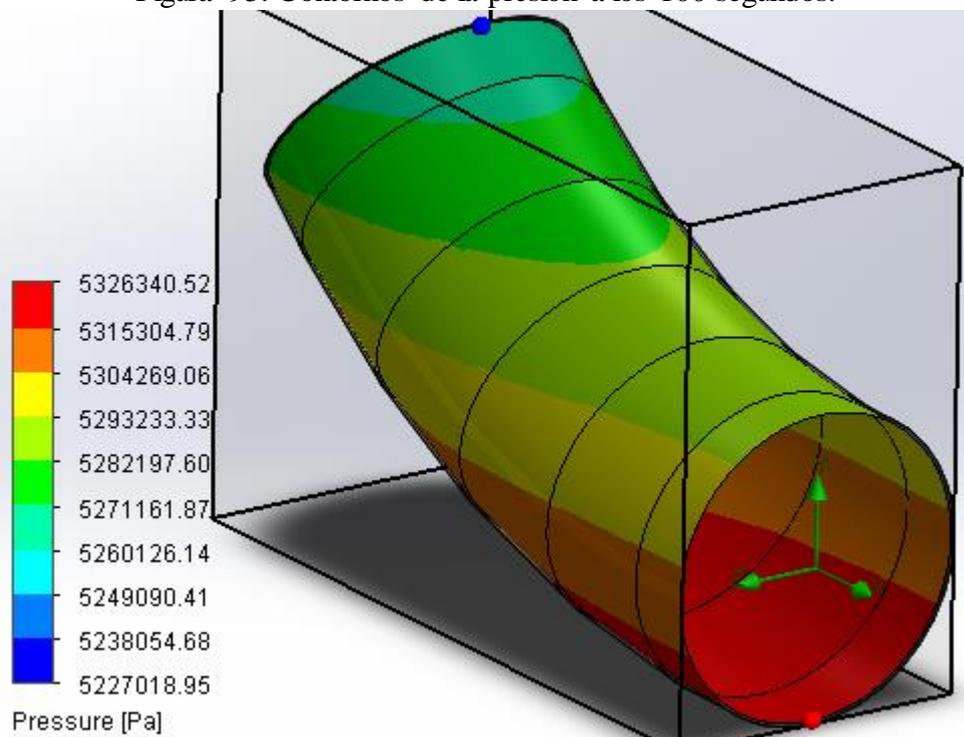
Fuente: Autor.

Figura 92. Contornos de la presión a los 5 segundos.



Fuente: Autor.

Figura 93. Contornos de la presión a los 100 segundos.



Fuente: Autor.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

En este trabajo se ha llegado a analizar los principios físicos y las ecuaciones matemáticas, de las leyes principales de transporte para un fluido newtoniano incompresible, que fluye dentro de un conducto cerrado.

Se ilustró la metodología para resolver problemas de transporte de fluidos usando los principios de Lagrange y Euler. Comenzando de su fundamento matemático y transformándole a ecuaciones algebraicas, con los métodos de volúmenes finos y de diferencias finitas. Todos estos procedimientos se los aplica sobre el dominio computacional.

Se estudió las características físicas y geométricas de los accesorios que son datos fundamentales para el pre-proceso, donde se analizó cómo diseñar los accesorios, los tipos de materiales que se utiliza, analizar las variables físicas como pérdidas, presión velocidad, tensiones de Reynolds, modelos turbulentos, etc.

En los resultados del análisis transitorio se demostró el efecto del golpe de ariete en los accesorios, al tener valores diferentes de la presión que ejerce en las paredes cuando va variando la velocidad en función del tiempo.

Debido a que este trabajo es un complemento de una tesis anterior, se han obtenido los resultados tomando como referencia el valor de 5,313MPa de presión estática, validando los resultados de fenómenos de flujo.

Mediante los resultados de los parámetros de presión interior, fuerza de fricción, fuerza total y fuerza que se ejerce en la pared, se puede pasar a la selección de material y al análisis de las características técnicas de cada accesorio como espesor y forma geométrica.

## **5.2 Recomendaciones.**

Poseer computadoras con hardware de alto rendimiento, para realizar con mayor facilidad estos tipos de simulaciones.

Tener bases de conocimiento de los principios físicos y matemáticos de los fenómenos a estudiar para poder programar en los paquetes computacionales de CFD.

Realizar un estudio cuando se vacíe la tubería de presión, para verificar si no existen deformaciones o fallas producidas por la depresión.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**ANSYS-INC.** Tutorial ICEM-CFD 16.0. 2015, pp. 500-520

**UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT BERKELEY.** "Desing Guidelines for Pressure Tunnels and Shafts". *EPRI* [en línea], 1987, (United State of America) <http://www.epri.com/>. *http://www.epri.com/*. [En línea] 6 de 1987. 1745(1), pp. B7-B8 [Consulta el: 3 de 9 de 2015.] ISSN 5273. Disponible en: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=AP5273&Mode=download>.

**CASTILLO OROZCO, Eduardo A.** Validación de un Modelo CFD para Análisis de Golpe de Ariete en Conductos Cerrados. [En línea] (tesis).(Ingeniería) Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela de Ingeniería Mecánica, Guayaquil, Ecuador. 2012. pp. 89-120. [Consulta: 2015-10-10.]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31036>.

**EPRI AP-5273 .** *Desing Guidelines for pressure Tunnels and Shafts*. Salto estático.

**CEDEÑO MORALES, Miguel Angel.** Estandarización del Cálculo Estructural para Tubería de Presión para centrales Hidroeléctricas. (tesis).(Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Riobamba, Ecuador. 2014. pp. 137-155.

**CENGEL, Yunus A. & SIMBALA, Jhon.** *Memcánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. 3<sup>ra</sup> ed. México-México: Mc Grall Hill 2006, pp 324-328.

**SINGHAL M. k. & ARUN Kumar.** "Determining Diameters for power tunenels ad presure Shafts". *International Journal of Energy and Power Engineering* [en línea], 1987, (India) 4(4), pp 1-2. [Consulta: 2 de agosto 2015]. ISSN 2326-957X. Disponible en: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.ijepe.20150404.14.pdf>

**FREZIGER, J. H. & PERIC', M.** *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3<sup>ra</sup> ed.

New York-Estados Unidos: Springer. 2002, pp 70-75.

**GARCIA VALDEOLIVAS, Jose Luis.** Comportamiento Estructural de Tuberías Forzadas y Blindajes en Saltos Hidroeléctricos. Propuestas de Diseño y Cálculo. [En línea] (tesis).(Maestría) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. 2013. [Consulta: 20 de 11 de 2015.]. Disponible en: [http://oa.upm.es/22073/1/Jose\\_GarciaValdeolivas.pdf](http://oa.upm.es/22073/1/Jose_GarciaValdeolivas.pdf)

**HACHEM, Fadi & SCHLEISS, Anton.** *Dimensionnement des galeries et puits blindés Design of steel lined pressure tunnels and shafts* [En línea]. Suiza, 2009. [Consulta: 15 de Agosto de 2015.]. Disponible en: [http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/stream\\_file.php?file=000000010933.pdf&name=000000290700](http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/stream_file.php?file=000000010933.pdf&name=000000290700).

**KNUT, Andreas** *Conservation Laws and Finite-Volume Methods*. [En línea] Oslo, 2005. [Consulta: 15 de Mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.uio.no/emner/ma.no/studiertnat/ifi/INF2340/v05/foiler/sim05.pdf>

**PEREIRA, Ana & RAMOS, Helena** *CFD for hydrodynamic efficiency and design optimization of key elements of SHP*. [En línea]. Lisbon, 2010. [Consulta: 15 de Diciembre de 2015]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/45825716\\_h\\_CFD\\_for\\_hydrodynamic\\_efficiency\\_and\\_design\\_optimization\\_of\\_key\\_elements\\_of\\_SHP](https://www.researchgate.net/publication/45825716_h_CFD_for_hydrodynamic_efficiency_and_design_optimization_of_key_elements_of_SHP)

**RAJESH, Bhaskaran** *Handout 4.1 Fluids Big Ideas*. [En línea]. New York, 2016. [Consulta: 25 de Junio de 2016.] Disponible en: [https://d37djvu3ytnwxt.cloudfront.net/assets/courseware/v1/2d56aef9b2b0ed6be4f803d0f4b5409a/assetv1: CornellX+ENGR2000X+2T2016+type@asset+block/Handout\\_4.1\\_Fluids\\_Big\\_Ideas\\_WithoutNotes.pdf](https://d37djvu3ytnwxt.cloudfront.net/assets/courseware/v1/2d56aef9b2b0ed6be4f803d0f4b5409a/assetv1: CornellX+ENGR2000X+2T2016+type@asset+block/Handout_4.1_Fluids_Big_Ideas_WithoutNotes.pdf).

**SEZAI, Ibrahim** *Conservation Laws of Fluid Motion and Boundary Conditions. Capitulo II*. [En línea]. Los Angeles, 2014. [Consulta: 20 de Enero de 2016.] Disponible en: [http://dip.sun.ac.za/courses/CFD/CFD\\_2016\\_2.pdf](http://dip.sun.ac.za/courses/CFD/CFD_2016_2.pdf)

**USBR <sup>0</sup>N8.** *Welded Steel Penstocks: esfuerzos.*

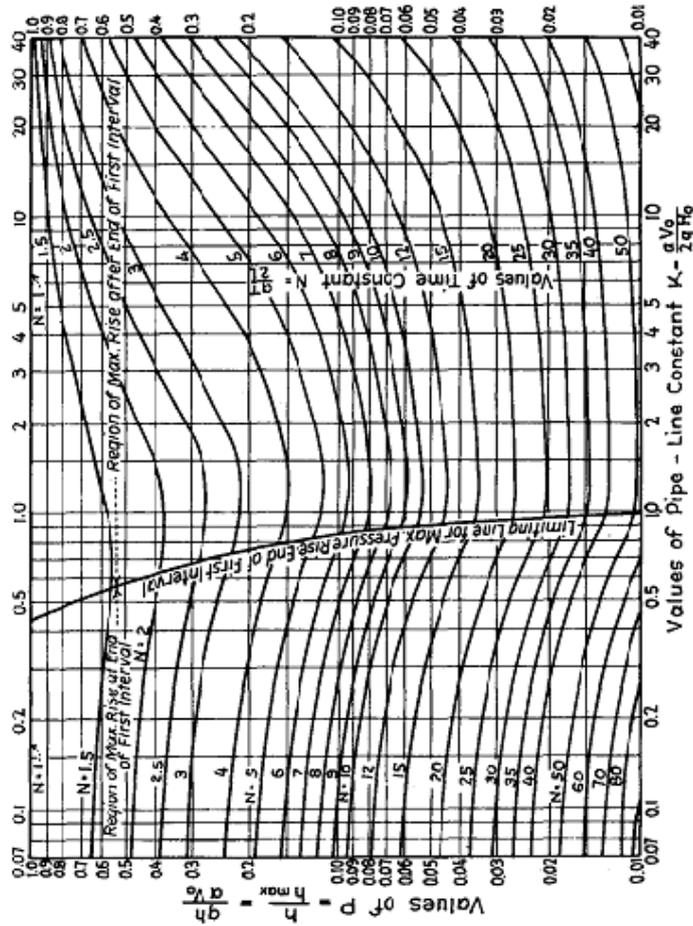
**VAUGHAN, Voller.** Basic Control Volume Finite Element Methods for Fluids and Solids. Minnesota Estados Unidos: IISc Press, 2009, pp. 1-25

# **ANEXOS**

A. Valores de la sobrepresión.

**EXPLANATION**

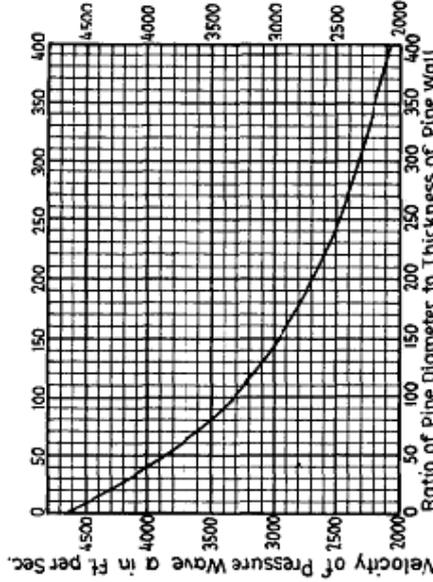
- P = Pressure Rise as a proportion of  $h_{max}$ .
- h = Pressure Rise or excess Head above normal, Feet.
- $h_{max}$  = Pressure Rise of instantaneous closure =  $aV_0/g$ , Feet.
- g = Acceleration of Gravity, Feet per second per second.
- a = Velocity of Pressure Wave along Pipe, Feet per second - See graph.
- $V_0$  = Velocity in Pipe near gate, corresponding to  $H_0$  and  $Q_0$ , Feet per second.
- $H_0$  = Initial Steady Head near gate, corresponding to  $V_0$ , Feet.
- $Q_0$  = Initial Steady Flow in pipe prior to start of gate closure corresponding to  $H_0$ , Cu. Ft. per sec.
- T = Time of gate closure travel, Seconds.
- L = Length of pipe from gate to forebay or other point of relief, Feet.



**CHART SHOWING MAXIMUM PRESSURE RISE WITH UNIFORM GATE MOTION AND COMPLETE CLOSURE : BASED ON ELASTIC-WATER-COLUMN THEORY**

NOTE: Ratio of Pressure Rise "h" to Initial Steady Head "H<sub>0</sub>" determined from relation  $2 KP = h/H_0$

**WELDED STEEL PENSTOCKS**

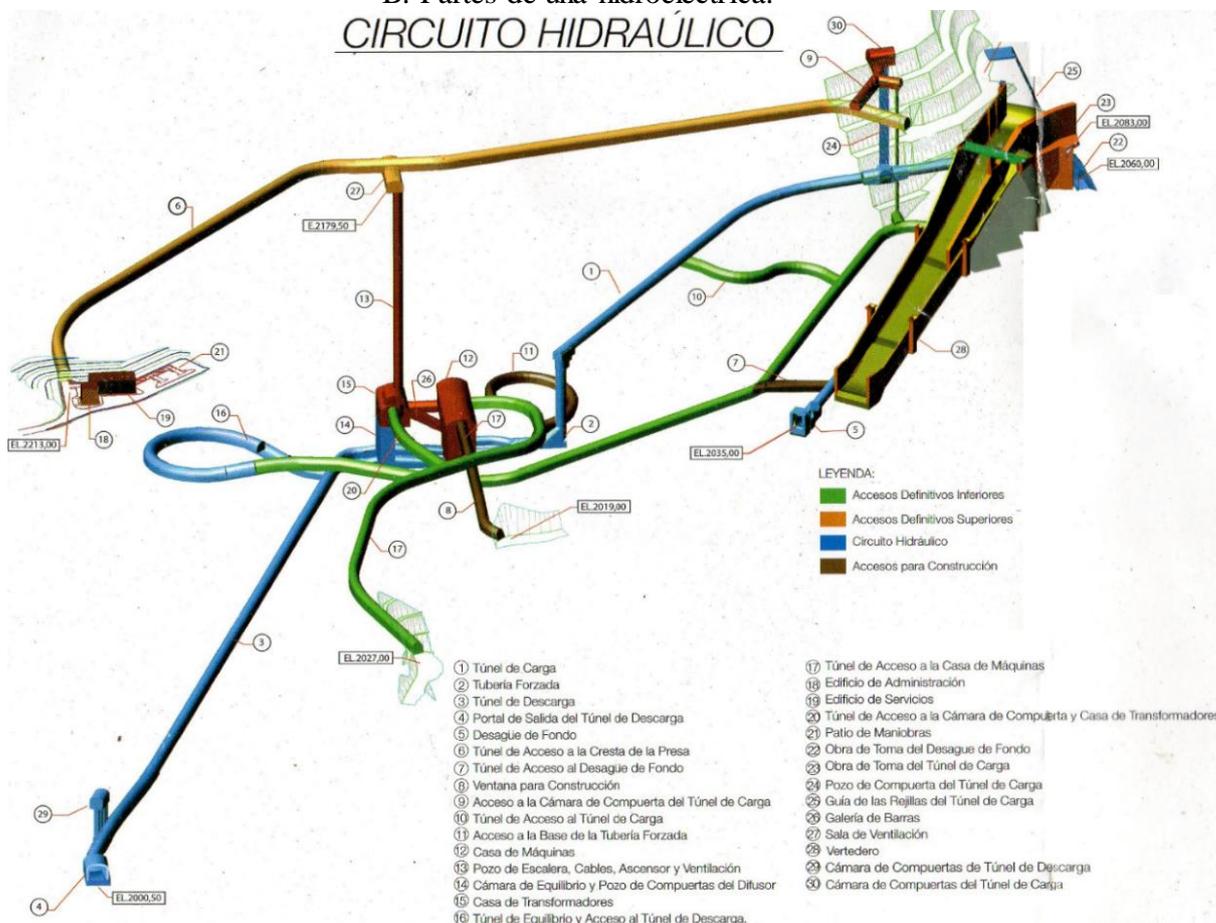


**CHART SHOWING VELOCITY OF TRAVEL OF PRESSURE WAVE IN ELASTIC WATER COLUMN**

$$\text{Formula: } a = \sqrt{\frac{4660}{1 + \frac{Kd}{Eb}}} = \sqrt{\frac{4660}{1 + \frac{d}{100b}}}$$

- Where a = Velocity of Travel of Pressure Wave, Ft. per Sec.
- K = Bulk Modulus of Elasticity of Water = 294,000 Lbs. per Sq. In.
- E = Young's Modulus for Pipe Walls = 29,400,000 lbs. per Sq. In. approx. for Steel.
- b = Thickness of Pipe Walls, Inches.
- d = Inside Diameter of Pipe, Inches.

B. Partes de una hidroeléctrica.  
CIRCUITO HIDRAÚLICO



- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>① Túnel de Carga</li> <li>② Tubería Forzada</li> <li>③ Túnel de Descarga</li> <li>④ Portal de Salida del Túnel de Descarga</li> <li>⑤ Desague de Fondo</li> <li>⑥ Túnel de Acceso a la Cresta de la Presa</li> <li>⑦ Túnel de Acceso al Desagüe de Fondo</li> <li>⑧ Ventana para Construcción</li> <li>⑨ Acceso a la Cámara de Compuerta del Túnel de Carga</li> <li>⑩ Túnel de Acceso al Túnel de Carga</li> <li>⑪ Acceso a la Base de la Tubería Forzada</li> <li>⑫ Casa de Máquinas</li> <li>⑬ Pozo de Escalera, Cables, Ascensor y Ventilación</li> <li>⑭ Cámara de Equilibrio y Pozo de Compuertas del Difusor</li> <li>⑮ Casa de Transformadores</li> <li>⑯ Túnel de Equilibrio y Acceso al Túnel de Descarga.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>⑰ Túnel de Acceso a la Casa de Máquinas</li> <li>⑱ Edificio de Administración</li> <li>⑲ Edificio de Servicios</li> <li>⑳ Túnel de Acceso a la Cámara de Compuerta y Casa de Transformadores</li> <li>㉑ Patio de Maniobras</li> <li>㉒ Obra de Toma del Desagüe de Fondo</li> <li>㉓ Obra de Toma del Túnel de Carga</li> <li>㉔ Pozo de Compuerta del Túnel de Carga</li> <li>㉕ Guía de las Rejillas del Túnel de Carga</li> <li>㉖ Galería de Barras</li> <li>㉗ Sala de Ventilación</li> <li>㉘ Vertedero</li> <li>㉙ Cámara de Compuertas de Túnel de Descarga</li> <li>㉚ Cámara de Compuertas del Túnel de Carga</li> </ul> |
|--|--|

Fuente: Proyecto Mazar