



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE MEDIDORES
DE FLUJO UTILIZANDO DINÁMICA DE
FLUIDOS COMPUTACIONAL.**

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (máster) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA

**ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE MEDIDORES DE FLUJO UTILIZANDO
DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Jiménez, Francis

CI.21.019.433

León, Eliecer

CI.. 25.354.669

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V

San Diego, Agosto 2018



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-M-002-2018-1

Valencia, 30 de Mayo de 2018.

Ciudadanos:
Jiménez Francis
C.I: 21.019.433
León Eliécer
C.I: 25.354.669
Presente -

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2018 de fecha 30/05/2018 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE MEDIDORES DE FLUJO UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL" presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Carballo, C.I. 12.014.408 y la Ing. Alicia Yanez de Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Zulay Salcedo

Prof. Zulay Salcedo
Decana de la Facultad de Ingeniería

c. e. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

ZS-9



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero GRUBER A. CARABALLO V, portador de la cédula de identidad N° 12.014.408, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el(los) ciudadano(s), Jiménez Hidalgo Francis Jimmeldith, León Salmerón Eliecer Efraín, portador(es) de la cédula de identidad N° 21.019.433 y 25.354.669, (respectivamente), titulado **ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE MEDIDORES DE FLUJO UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**, Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 26 días del mes de Julio del 2018.

Firma Ing. Gruber A. Carballo V

12014.408

Tutor Académico

AGRADECIMIENTO

Jiménez Francis.

Le agradezco primeramente a Dios, por ser mi guía, por darme sabiduría para alcanzar mis metas.

A mi madre Elsa Hidalgo, mi gran amiga, mi ejemplo de lucha y valentía, gracias por darme lo más importante y es convertirme en el ser humano que soy hoy en día.

A mi hijo Benjamín González, gracias por la fuerza que me das todos los días con tu sonrisa sincera y llena de luz, gracias por enseñarme lo que es un corazón noble y valiente.

A mis padres Jimmy Jiménez y Alexis Zavala, gracias por mostrarme el camino de los hombres buenos, por el increíble apoyo durante mi carrera.

A mis hermanos; Jimmy Jiménez y Carlos Jiménez, donde hoy físicamente nos separa una gran distancia, sin embargo, esa distancia no impide que nos mantengamos unidos apoyándonos, les agradezco lo que soy, las vivencias que pasamos que nos llevo a convertimos en quienes somos, gracias por cada lección.

A mis familiares; Edith Hidalgo, Mercy Granadillo, Alejandro Granadillo, Ali Granadillo y Yadixza Valdéz, por tanto cariño, apoyo y por incluirme siempre en sus oraciones que ya luego se convierte en victorias.

A mis amigos Yohnny González, Laura Delfín, quienes han estado conmigo desde el inicio de este camino, gracias por el apoyo y su sincera amistad.

A mi tutor Gruber Caraballo, quien genera en mi tanto respeto y admiración, gracias por su tiempo, por su apoyo y compartir conmigo sus conocimientos para lograr finalizar este trabajo de grado.

A mis compañeros y futuros colegas, gracias por cada granito que aportado.

León Eliecer.

Quiero agradecer a mis padres **Eliecer A León V y Milena J Salmerón C** primeramente, por todo el apoyo brindado, a mi papa por ser insistente conmigo en la carrera apoyándome para seguir adelante y no desviarme en ningún momento, en hacer un gran esfuerzo por mantenerme estudiando y por sus consejos. A mi mama por estar siempre pendiente de mi apoyándome con su alegría y consentimiento, dándome fuerzas y serenidad en toda la carrera, hoy cumpliendo lo que le dije hace 17 años mientras descansábamos.

A mis tíos Eycer León y Marisabel Gil, por haberme acogido en su casa hogar para poder hacer este sueño realidad, por sus consejos, regaños y cariño brindado a lo largo de la carrera. A mi primo Eycer E León G, por haberme asistido en muchas dudas en mis materias: física II, circuitos y maquinas eléctricas e instrumentación y por ser más que un primo, ser como un hermano para mí.

A mi abuela Libia Vásquez que desde lo alto le agradezco por haberme criado en gran parte de mi niñez, por haber creído en mí a pesar de mis defectos, por haberme enseñado a respetar, valorar y a seguir adelante en todo momento, valores fundamentales para llegar hasta donde he llegado.

Agradezco al **Ing. Gruber Caraballo**, por ser nuestro tutor académico y aceptar comprometerse con nosotros para la realización de este trabajo de grado, transmitiéndonos conocimiento y apoyándonos en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS.....	xvi
LISTA DE GRÁFICAS.....	xviii
RESUMEN.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1.Planteamiento del problema	3
1.2. Formulación del problema	4
1.3 Objetivos de la investigación	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivo Específicos.....	4
1.4 Justificación de la Investigación.....	5
1.5. Alcance.....	5
 II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases teóricas.....	8
2.2.1 Introducción a la Mecánica de fluidos.....	9
2.2.2 Definición de Fluido	9
2.2.3 Viscosidad de un Fluido.....	10
2.2.3.1 Variación de la Viscosidad.....	10
2.2.4 Fluidos Newtonianos.....	12

2.2.5 Fluidos No Newtonianos.....	14
2.2.6 Definición de Presión.....	16
2.2.7 Número de Reynolds.....	17
2.2.7.1 Flujo Laminar.....	18
2.2.7.2 Flujo Turbulento.....	18
2.2.8 Ecuación de Continuidad.....	20
2.2.9 Teorema de Bernoulli.....	22
2.2.10 Coeficiente de Descarga.....	25
2.2.10.1 Coeficiente de Descarga para una Placa Orificio.....	25
2.2.10.2 Coeficiente de Descarga para un Tubo Venturi.....	26
2.2.11 Medidores de Flujos.....	27
2.2.12 Placa Orificios.....	29
2.2.12.1 ¿Cómo funcionan las Placas Orificios?.....	29
2.2.12.2 Tipos de Placas Orificios.....	30
2.2.12.3 Cálculo para Placas Orificios.....	32
2.2.13 Tubo Venturi.....	36
2.2.13.1 Aplicaciones Tubo Venturi.....	37
2.2.14 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	40
2.2.15 Fundamentos de CFD.....	41
2.2.15.1 Ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos.....	41
2.2.16 Simulación en CFD.....	42
2.2.16.1 Generación del modelo 3D.....	42
2.2.16.2 Mallado del dominio o discretización espacial.....	42
2.2.16.3 Resolución de Ecuaciones.....	46
2.2.16.4 Criterio de convergencia de “RMS”.....	47
2.2.16.5 Número adimensional Y^+	48
2.2.16.6 Procedimiento general para la solución en CFD.....	48
2.2.16.7 Análisis de ecuaciones.....	50

2.3 Glosario de Términos.....	51
III MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo y Nivel de la investigación.....	54
3.2 Diseño de la investigación.....	55
3.3 Población y Muestra.....	56
3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	56
3.5 Fases Metodológicas.....	57
IV RESULTADOS	
4.1 Identificar las variables, los parámetros y las normas que rigen el uso de medidores de flujos de tipo Placas Orificios y Tubo Venturi... ..	60
4.1.1 Placa Orificio.....	60
4.1.1.1. Tomas de presión.....	68
4.1.2 Diseño del Tubo Venturi.....	68
4.2 Uso del software CAD como herramienta de dibujo asistido para modelar digitalmente las geometrías más utilizadas de dichos medidores.....	73
4.2.1 Geometría diseñadas para la Placa Orificio y el Tubo Venturi.....	73
4.2.1.1 Geometría para la Placa orificio.....	73
4.2.1.2 Geometría para el Tubo Venturi.....	75
4.3 Discretizar el dominio y fijar las condiciones de borde del modelo aplicando las ecuaciones de gobierno para el campo de flujo.....	76
4.3.1 Discretización de los diseños a estudiar.....	76
4.3.2 Mallado del Dominio del Fluido.....	77
4.3.2.1 Mallado del diseño de la Placa Orificio.....	78
4.3.2.2 Mallado del diseño del Tubo venturi.....	78
4.3.3 Condiciones de contorno de los modelo físico y campos de flujo a estudiar.....	79

4.3.4 Establecimiento de las condiciones de borde.....	79
4.3.4.1 Dominio del diseño de la Placa Orificio.....	80
4.3.4.2 Dominio del diseño del Tubo Venturi.....	82
4.3.5 Criterios de convergencia.....	84
4.4 Realizar la simulación del campo de flujo.....	85
4.4.1 Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia.....	85
4.4.1.1 Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para el dominio de la Placa Orificio.....	85
4.4.1.2 Visualización de los resultados de Presión, Velocidad y Turbulencia en la Placa Orificio.....	88
4.4.1.3 Comportamiento de Líneas de Flujos y Vectores en la Placa Orificio.....	94
4.4.1.4 Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para el dominio del Tubo Venturi.....	95
4.4.1.5 Visualización de los resultados de Presión, Velocidad y Turbulencia en el Tubo Venturi.....	98
4.4.1.6 Comportamiento de Líneas de Flujos y Vectores en el Tubo Venturi.	104
4.5. Obtener los resultados en forma de datos y por medio de representaciones gráficas de las variables y parámetros que describen el fenómeno.....	107
4.5.1 Placa Orificio.....	107
4.5.2 Tubo Venturi.....	109
4.6 Describir de los resultados basados en los principios físicos de la mecánica de fluidos.....	111
CONCLUSIONES.....	114
RECOMENDACIONES.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	117

APÉNDICE

A	Tabla de dimensiones de la Placa Orificio Seleccionada.....	119
B	Tabla de tubería de Acero calibre 40.....	120
C	Tabla de Propiedades físicas del agua.....	121
D	Configuración del Default Domain para ambos diseños.....	122
E	Planos de la Placa Orificio.....	123
F	Planos del Tubo Venturi.....	126
G	Diseño CAD para la Placa Orificio.....	129
H	Diseño CAD para el Tubo Venturi.....	131
I	Graficas de convergencia RMS de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para la Placa Orificio y el Tubo Venturi.....	134
	ANEXOS.....	138

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	CONTENIDO	pp.
1	Esfuerzo cortante en un sólido y en un fluido.....	9
2	Tabla de Viscosidades dinámicas del agua.....	11
3	Tabla de Viscosidades dinámicas y cinemática de varios fluidos...	12
4	Tabla de Unidad de viscosidad Dinámica y Cinemática.....	14
5	Reogramas para distintos tipos de fluidos.....	15
6	La presión actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido.....	17
7	Tubo de corriente utilizando para la obtención de la ecuación de continuidad en forma integral.....	20
8	Elemento de fluido.....	22
9	Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli.....	23
10	Gráfica típica de C_d vs Re en una Placa Orificio.....	26
11	Gráfica típica de C_d vs Re en un Tubo Venturi.....	27
12	Esquema de cómo se comporta una placa orificio.....	30
13	Placas de orificio concéntricas de arista viva (versión estándar)....	30
14	Placas de orificio concéntricas cuarto de círculo y cónicas.....	31
15	Placas de orificio excéntricas.....	31
16	Placas de orificio concéntricas segmentadas.....	32
17	Diagrama de pérdida de carga en una placa orificio.....	35
18	Tubo Venturi.....	37
19	Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices.....	44

20	Mesh orthogonality.....	45
21	Mesh expansion factor.....	45
22	Mesh aspect ratio.....	46
23	Geometría Diseñada para la instalación de la Placa Orificio.....	74
24	Dominio del Fluido para el diseño de la Placa Orificio.....	74
25	Geometría Diseñada para la instalación del Tubo Venturi.	75
26	Dominio del Fluido para el diseño del Tubo Venturi.	76
27	Nombres de las regiones para diseño de Placa Orificio.	77
28	Nombres de las regiones para el diseño del Tubo Venturi.....	77
29	Mallado tetraédrico en el dominio del diseño para la Placa Orificio.	78
30	Mallado tetraédrico refinado en el dominio del diseño del Tubo Venturi.....	79
31	Configuración básica de la condición de borde “Inlet”, flechas de flujo sobre la superficie de entrada del diseño. Placa Orificio.....	80
32	Configuración de borde de las paredes “Wall”. Placa Orificio.	81
33	Configuración de borde de la Salida “Outlet”. Placa Orificio.....	82
34	Configuración básica de la condición de borde “Inlet”. Tubo Venturi.....	82
35	Configuración de borde de las paredes “Wall”. Tubo Venturi.....	83
36	Configuración de borde de la Salida “Outlet”. Tubo Venturi.....	84
37	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de m	

39	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 57,05179008$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	91
40	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 85,57768512$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	92
41	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 104,5949485$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	93
42	Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 11,8857896$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	94
43	Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 903,3200096$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	95
44	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 80,4185345$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	99
45	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 128,6696552$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	100
46	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 386,0089656$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	101
47	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 579,0134484$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	102
48	Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 707,6831036$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	103

49	Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 80,4185345$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	105
50	Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 4825,11207$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	106

LISTA DE TABLAS

TABLAS	CONTENIDO	pp.
1	Tabla Principios y tipos de medidores de flujos.....	28
2	Velocidades de la sección 1 y 2 de la Placa Orificio.....	64
3	Propiedades físicas del agua.....	64
4	Dimensiones y parámetros para el cálculo de una Placa Orificio.....	65
5	Valores para el cálculo de una Placa Orificio.....	65
6	Valores arrojados en la constante A, en la variación de Números de Reynolds.....	66
7	Cálculos teóricos de la Placa Orificio.....	67
8	Parámetros para el Tubo Venturi	70
9	Velocidades en la sección 1 y 2 del Tubo Venturi.....	70
10	Parámetros para calcular Números de Reynolds.....	71
11	Flujo Másico y Caudal de la sección 1 y 2 del Tubo Venturi, variando sus velocidades.....	71
12	Tabla de Número de Reynolds y Coeficiente de Descarga.....	72
13	Flujos Masicos de entrada. Placa Orificio.....	81
14	Flujos másicos de entrada. Tubo Venturi.....	83
15	Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para el dominio de la Placa Orificio.....	88
16	Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para el dominio del Tubo Venturi.....	98
17	Cálculos simulados de la Placa Orificio.	107
18	Error absoluto para la Placa Orificio.....	109

19	Cálculos simulados del Tubo Venturi.....	109
20	Error absoluto para el Tubo Venturi.....	111

LISTA DE GRÁFICAS.

GRAFICA	CONTENIDO	pp.
1	Curva típica de Cd vs Re con valores teóricos en la Placa Orificio.	67
2	Curva típica de Cd vs Re con valores teóricos en el Tubo Venturi.	73
3	Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 11,8857896$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	86
4	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K- condiciones de borde igual a $m = 11,8857896$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	87
5	Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 80,4185345$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	96
6	Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K- condiciones de borde igual a $m = 80,4185345$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.....	97
7	Curva típica de Cd vs Re con valores simulados de una Placa Orificio.....	108
8	Curva típica de Cd vs Re en una Placa Orificio, mostrando valores teóricos y simulado.....	108
9	Gráfico de una curva típica de Cd vs Re con valores simulados en el Tubo Venturi.	110
10	Curva típica de Cd vs Re con valores teóricos y simulados en el Tubo Venturi.....	110



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE MEDIDORES DE FLUJO UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.

Autor:

Jiménez, Francis

León, Eliecer

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V

Fecha: Agosto, 2018

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, se enfoca en realizar estudios Hidrodinámicos de medidores de flujo tipo Placa Orificio y Tubo Venturi utilizando la herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para lograr entender el comportamiento del fluido y todos los fenómenos presenten durante la medición. Los medidores de flujos tienen un papel importante al diseñar una red de flujo, gracias a ellos podemos evitar grandes problemas de sobrecarga en nuestras redes que podrían implicar un gasto para la empresa o industria, conociendo así, el flujo másico transitado a lo largo de la tubería del diseño, a través de la ecuación de la continuidad y la ecuación de Bernoulli. A partir de este, se estudia el comportamiento del campo de flujo, a través del Número de Reynolds (Re) y Coeficiente de Descarga (Cd). El comportamiento de fluido se muestra en forma de curvas generadas por la variación de la velocidad del fluido aguas arriba, mostrando el valor de Re vs Cd , teniendo en cuenta que, para este estudio, el proceso de la transferencia de calor es totalmente adiabático con respecto a las paredes de las tuberías del diseño. Por último, se realizaron varias simulaciones con diferentes velocidades con el método de CFD, donde los resultados obtenidos fueron precisos y el comportamiento de las curvas características de los medidores de fluidos coinciden con las curvas obtenidas teóricamente de los catálogos seleccionados.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional (CFD), Placa Orificio, Tubo Venturi, Mecánica de fluidos, Medidores de flujos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las industrias se han visto afectadas debido al crecimiento de la demanda actual de la sociedad, haciendo que las mismas tengan que realizar modificaciones en algunas líneas de procesos, entre una de las partes fundamentales que tienen que ser modificada casi siempre para el funcionamiento de una planta se encuentran las redes de flujos, parte fundamental para alimentación de equipo, procesos y muchas otras cosas, por ende, las mediciones de flujos son necesarios para poder rediseñar de forma segura.

Gracias a la mecánica de fluidos y a los medidores de flujos podemos contar con las ecuaciones fundamentales para realizar los cálculos respectivos de estas mediciones y tomar la mejor decisión, sin embargo, realizar estos estudios de forma experimental es algo costoso por los equipos que se requieren.

En la actualidad se ha venido implementando la utilización de programas de simulación numérica de fenómenos físicos en fluidos o mejor conocido como CFD (Computational Fluid Dynamics), que permite analizar situaciones de distintos tipos de fluidos, para ver como interaccionan estos con cuerpos sólidos.

En la siguiente investigación realizaremos las simulaciones de los medidores de flujo tipo Placa Orificio y Tubo Venturi. Estas herramientas permiten a los distintos usuarios realizar modelos virtuales que les darán gran cantidad de información reduciendo tanto costes como tiempos de ingeniería. Además, permitirá mejorar la fiabilidad y rendimiento de sus productos y proyectos gracias a la posibilidad de evaluar distintas alternativas de diseño, con condiciones de operación variables.

Se estudiará el comportamiento hidrodinámico en los distintos medidores de flujo haciendo énfasis en las pérdidas generadas en ambos medidores, con el fin de demostrar con resultados comparativos la confiabilidad de la herramienta CFD utilizada para el análisis.

La investigación se contempla de la siguiente manera:

En el capítulo I, se plantea la formulación del problema a estudiar y se establece el objetivo general y los objetivos específicos al alcanzar en la investigación, la justificación y el alcance de la misma.

El capítulo II, contempla los antecedentes que contribuyen con información y datos para el desarrollo de la investigación, de igual manera se plasmaron las bases teóricas correspondientes a las ecuaciones necesarias, tipos de medidores y fundamentos teóricos de la herramienta CFD.

El capítulo III, describe la metodología a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para el tipo de investigación.

El capítulo IV, Detalla los resultados mediante las fases metodológicas definidas en el capítulo anterior, cumpliendo así los objetivos requeridos para este trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad existen avances importantes, específicamente en la medición de flujo; debido a la realización de pruebas y ensayos en laboratorios que poseen equipos de alta tecnología: resultando de esta manera un estudio costoso en tiempo y dinero.

La dinámica de fluidos computacional (CFD. por sus siglas en inglés - Computational Fluid Dynamics); se ha convertido en una herramienta importante para los ingenieros que estudian el comportamiento de los diferentes tipos de flujos. Consiste en el análisis del movimiento de los fluidos mediante simulaciones computacionales, cuyo objetivo es la búsqueda de una solución aproximada de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos, discretizando o dividiendo el dominio de cálculo en elementos y resolviendo allí dichas ecuaciones.

Por esta razón con la herramienta adecuada y la selección correcta de parámetros; los resultados finales de análisis realizados con ayuda del CFD pueden aproximarse con bastante precisión a los resultados obtenidos experimentalmente. Asimismo, los análisis de diferentes condiciones del fluido pueden realizarse inmediatamente; debido a que las variables de entrada pueden modificarse según las condiciones en que se encuentra el fluido. La medición del flujo es una función importante dentro de cualquier organización que emplee fluidos para realizar sus operaciones regulares. Existen una gran variedad de medidores de flujos que se han desarrollado con el transcurrir del tiempo; este desarrollo se lo ha realizado en laboratorios con equipos de alta tecnología; y además el tiempo que es utilizado para el desarrollo de estos ha sido elevado; causando de este modo un alto costo en tiempo y dinero para el desarrollo de cualquier

medidor de flujo. Dos de los medidores de flujo más usados son la placa orificio y el tubo de Venturi, por la versatilidad de aplicaciones a diferentes viscosidades, por su instalación y la ventaja principal, su simplicidad constructiva. Sin embargo, cada fabricante tiene un ensayo particular para validar y/o calibrar el medidor, resultando en procedimientos no estandarizados que resultan inconvenientes a la hora de no disponer de las curvas representativas particulares de los medidores.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se podrían evaluar las condiciones hidrodinámicas de los medidores de flujo del tipo placa orificio y tubo de Venturi usando técnicas de aproximación numérica del tipo CFD para elaborar sus curvas representativas de operación?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General.

Estudiar las condiciones hidrodinámicas de medidores de flujo utilizando dinámica de fluidos computacional

1.3.2 Objetivos Específicos.

Identificar las variables, parámetros y normas que rigen el uso de medidores de flujo del tipo placa orificio y tubo de Venturi.

Modelar digitalmente las geometrías más utilizadas de dichos medidores utilizando una herramienta de dibujo asistido por computadora CAD.

Discretizar el dominio, fijar las condiciones de borde del modelo y aplicar las ecuaciones de gobierno para el campo de flujo.

Simular el campo de flujo.

Obtener los resultados en forma de datos y por medio de representaciones gráficas de las variables y parámetros que describen el fenómeno.

Describir los resultados basados en los principios físicos de la mecánica de fluidos.

1.4 Justificación de la investigación

En la actualidad ha crecido rápidamente el uso de las herramientas computacionales, también la velocidad de procesamiento de datos ha evolucionado rápidamente, evento que ha facilitado el estudio de muchos temas importantes en las distintas ramas de la ingeniería, es por eso que se pretende ampliar el campo de la dinámica de fluidos y turbomáquinas visto en el pensum de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez por medio de la utilización de estas herramientas, realizando más aportes de trabajos de grado relacionados con técnicas de aproximación numéricas basadas en la dinámica de fluidos computacional.

Estas herramientas permiten evaluar las ecuaciones de dinámica de fluidos que no se pueden trabajar analíticamente debido a sus complejidades matemáticas, por lo tanto, aplicar esta investigación, permite predecir las propiedades de flujo con más detalles y obtener resultados que de manera experimental no se podrían con el uso de medidores de presión mecánicos y/o electrónicos.

Una utilidad de las herramientas CFD, es que se tiene la posibilidad de excluir físicamente el equipo que se desea estudiar y obtener variables físicas en cualquier punto del espacio geométrico, solo basta con su dimensionamiento en un software de diseño computacional. De esta manera se obtienen beneficios para futuras investigaciones industrial, científicas y universitarias, convirtiéndose este trabajo como fuente de información.

1.5 Alcance

Esta investigación sólo se encargará del estudio del campo de flujo incompresible a través de los medidores de flujo del tipo placa orificio y tubo de Venturi, esto en virtud de que para el tiempo establecido no se pretende indagar en otros tipos de medidores que puedan existir. En dicho estudio se pretende visualizar los fenómenos de recirculación, capa límite y desprendimiento de capa límite, sin embargo, no se indagará en el estudio de otros tipos de inestabilidades como el golpe de ariete. El estudio y la simulación numérica sólo serán referidas para un modelo matemático específico, así como los resultados obtenidos sólo serán aplicables a los modelos de

medidores escogido a partir de un fabricante de reconocimiento mundial. Los resultados obtenidos serán arrojados en forma de datos y mediante el uso de gráficos experimentales de las variables que describen el fenómeno.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo viene a sustentar la investigación mediante las bases teóricas fundamentales de los medidores de flujos. Se incluyen las ecuaciones principales que describen el comportamiento del flujo de fluido incompresible, se plantean las bases teóricas para la modelación numérica de los fenómenos físicos presentes y se realiza una breve descripción del procedimiento para resolver problemas usando las técnicas de CFD.

2.1 Antecedentes

Para iniciar los antecedentes bibliográficos se encuentra la investigación de Sarango Femando (2015) en su Trabajo de Grado titulado "**Elaboración de Modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para Medidores de Flujos Volumétricos y Validación Experimental**", realizado en la Escuela Superior Politécnica Del Litoral y optar por el título Ingeniero Mecánico; en este trabajo se escogieron como modelo para simular los medidores de flujo de tipo Placas Orificio y Tubo Venturi, además se contó con un banco de pruebas para realizar ensayos con estos dos tipos de medidores y tener valores experimentales para luego realizar la construcción de las gráficas de coeficiente de descarga a distintos números de Reynolds. Se logró determinar que el tubo Venturi mediante el modelo CFD tiene el mismo comportamiento que el modelo experimental en las gráficas. La diferencia entre ambos modelos oscila entre un 0.5% a 1%, lo cual hace que el modelo CFD sea confiable y que el medidor de flujo Venturi está funcionando correctamente. En la placa Orificio se puede ver que a un bajo número de Reynolds la diferencia es muy baja entre el modelo CFD y el experimental. Entre mayor sea el número de Reynolds mayor es la diferencia entre ambos modelos, en el cual su diferencia máxima oscila entre un 9% y

11 o/o. Esta diferencia se debió principalmente por el estado del equipo de medición, además el rango de esta diferencia entre ambas gráficas; muestra que el modelo CFD para este medidor de flujo sea confiable.

Seguidamente la investigación realizada por, Iñiguez Covarrubias M, Flores Velázquez, J, Ojeda Bustamante W, Díaz-Delgado C & Mercado-Escalante R. (2015) **“Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional”**. Proyecto realizado en la Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería. El objetivo del trabajo consistió en validar la simulación de funcionamiento con DFC de un dispositivo Venturi con base en observaciones de laboratorio. La comparación de los resultados experimentales y mediante DFC fueron altamente satisfactorios para los valores de velocidad media (1.53 m s^{-1}), gasto ($0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y presión en el manómetro diferencial (15 cm de Hg). Una vez validado el modelo, se simularon ocho escenarios de operación, con variación de gasto desde $0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lo cual simplificó el modelo de la relación gasto(caudal)-pérdida de carga del Venturi, con una ecuación cuadrática y así eliminar la incertidumbre del coeficiente de descarga requerido en los análisis experimentales. Los valores característicos del dispositivo fueron un requerimiento de carga hidráulica mínima en la contracción del Venturi de 0.4 kg cm^{-2} , y una pérdida de carga total en el Venturi de 0.075 kg cm^{-2} para $Q_{\text{máx}}$ de $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Por último, se recomienda diseñar dispositivos Venturi con DFC y con ello obtener información confiable para su instalación en sistemas de riego.

Es por ello que estas investigaciones ya descritas, son fuentes de información para el presente trabajo de grado, ya que coinciden con los elementos como el Tubo Venturi y la Placa Orificio, utilizando la herramienta CDF para conocer el comportamiento del fluido a través de los medidores de flujos ya mencionados.

2.2 Bases teóricas

De acuerdo con Arias (2006), “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). Por lo tanto, la correcta

realización de las bases teóricas permitirá no solo obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

2.2.1 Introducción a la Mecánica de Fluidos.

Según Agustín Domingo (2011), en su obra “Apuntes de Mecánica de fluidos” la Mecánica de Fluidos estudia las leyes del movimiento de los fluidos y sus procesos de interacción con los cuerpos sólidos. La Mecánica de Fluidos como hoy la conocemos es una mezcla de teoría y experimento que proviene por un lado de los trabajos iniciales de los ingenieros hidráulicos, de carácter fundamentalmente empírico, y por el otro del trabajo de básicamente matemáticos, que abordaban el problema desde un enfoque analítico. p5.

2.2.2 Definición de Fluido.

Según Agustín Domingo (2011), en su obra “Apuntes de Mecánica de fluidos”,

Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometida a un esfuerzo cortante, sin importar qué tan pequeño sea. En cambio, un sólido experimenta un desplazamiento definido (o se rompe completamente) cuando se somete a un esfuerzo cortante. (Ver figura 1).

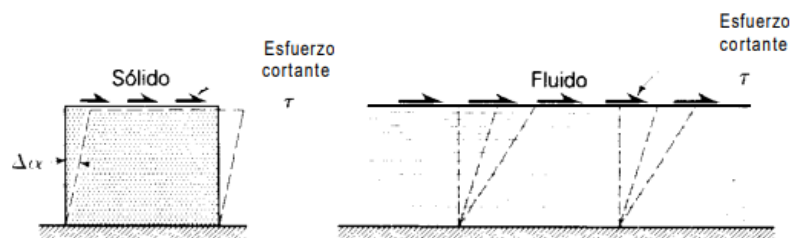


Figura 1. Esfuerzo cortante en un sólido y en un fluido

Fuente: Fernando Jamil (2015)

Dada la definición de fluido, se debe conocer los tipos de fluidos; los cuales son los líquidos y los gases. La distinción entre estos dos tipos de fluidos es técnica y concierne al efecto de las fuerzas cohesivas. Un líquido, al estar compuesto por

agrupaciones de moléculas muy cercanas con enormes fuerzas cohesivas, tiende a conservar su volumen y formará una superficie libre en un campo gravitatorio si no está limitado en su parte superior. (p.5)

2.2.3 Viscosidad de un Fluido.

La viscosidad es la causa de la resistencia que aparece en el flujo de un fluido en tuberías y canales y está relacionada con la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, en las que se produce rozamiento entre distintas partes del fluido. Por ejemplo, a causa de las fuerzas viscosas de rozamiento en una tubería, las capas de fluido más próximas a la pared (más lentas) frenan a las capas más interiores (más rápidas), apareciendo una distribución de velocidades.

Según Agustín Domingo (2011), en su obra “Apuntes de Mecánica de fluidos”, En general la viscosidad no depende apenas de la presión. Sin embargo, sí depende de la temperatura, y de una forma distinta para líquidos y gases. La viscosidad de un líquido disminuye con un aumento de la temperatura, mientras que la viscosidad de un gas tiene el comportamiento contrario, aumenta con la temperatura. Esto es debido a los distintos orígenes de la viscosidad en ambos casos.

La movilidad de las moléculas de un líquido es más limitada, con una presencia importante de fuerzas de cohesión, relacionada con las fuerzas de rozamiento y por tanto con la viscosidad, ya que son estas fuerzas de cohesión las que hacen que durante el movimiento del líquido unas capas frenen a otras. Cuando la temperatura aumenta la cohesión entre las moléculas disminuye, al aumentar la energía cinética de las mismas. Esto da como consecuencia una disminución de la viscosidad. La viscosidad de los líquidos se aproxima por la siguiente ley empírica. (p.7).

$$e^{-BT}$$

Ec.1

Donde:

A y B: Constantes de fluidos

T: Temperatura

Tanto A como B son magnitudes que se obtienen al ajustar la expresión anterior con los resultados experimentales de un líquido en particular.

En el caso de los gases las moléculas tienen una movilidad mucho mayor y el origen de la viscosidad está relacionado con el paso de moléculas de diferente energía entre distintas capas. Imaginemos dos capas adyacentes, cada una de ellas con una distinta velocidad de movimiento. En promedio las moléculas de la capa más rápida se mueven a mayor velocidad que las moléculas de la capa más lenta. Como en el sentido del flujo las moléculas de la capa más rápida se mueven en promedio a una velocidad mayor que las de la capa más lenta, el paso de moléculas de la capa más rápida a la más lenta se traducirá en una aceleración de la misma, mientras que el paso de moléculas de la capa más lenta a la más rápida se traducirá en un frenado de estas últimas, dando este movimiento aleatorio lugar al comportamiento viscoso del gas. Como superpuesto a este movimiento se tiene un movimiento aleatorio de las moléculas relacionado con la temperatura del gas, pasarán moléculas de la capa más rápida a la más lenta y viceversa. Este paso será tanto más rápido cuanto mayor sea la temperatura, y esto dará lugar a una mayor intensidad de la aceleración y el frenado a que hacíamos mención en el párrafo anterior, aumentando por tanto la viscosidad con la temperatura. Para ver viscosidades dinámicas del agua a distintas temperaturas con sus correspondientes densidades (ver Figura 2) y para viscosidades dinámicas y cinemática de varios fluidos junto con su densidad (ver Figura 3).

T (°C)	Viscosidad dinámica	Densidad	Viscosidad cinemática	T (°C)	Viscosidad dinámica	Densidad	Viscosidad cinemática
0	1793	999,841	1,793	60	469	983,21	4,770
10	1309	999,7	1,309	70	406	977,79	4,152
20	1006	998,2	1,008	80	357	971,8	3,673
30	800	995,65	0,803	90	315	965,31	3,263
40	657	992,21	0,662	100	284	958,35	2,963
50	550						

Figura 2. Tabla de viscosidades dinámicas del agua a distintas temperaturas con sus correspondientes densidades. La viscosidad dinámica se da en unidades de 10^{-6} Pas - 10^{-5} poise, la cinemática de 10^{-6} m²/s y la densidad en kg/m³.

Fuente: Agustín Martín (2011).

Fluido	T (°C)	Viscosidad dinámica	Densidad	Viscosidad cinemática
Mercurio	0	1690	13595	0,124
	50	1410	13472	0,105
	100	1220	13351	0,091
Etanol	20	1192	791	1,506
Metanol	20	591	810	0,730
Benceno	20	649	899	0,722
Gasolina	20	290	680-780	0,427
Glicerina	20	83×10^4	1260	658,7
Aceite de oliva	20	84×10^4	920	913,0
Aceite lubricante	20	26×10^4	900-920	279
Aire	20	18	1,293	13,92
Dióxido de carbono	20	16	1,977	8,09
Nitrógeno	20	18,4	1,251	14,71
Oxígeno	20	20,9	1,429	14,62

Figura 3. Tabla de viscosidades dinámicas y cinemática de varios fluidos junto con su densidad. La viscosidad dinámica se da en unidades de 10^{-6} Pas - 10^{-5} poise, la cinemática de 10^{-6} m²/s y la densidad en kg/m³.

Fuente: Agustín Martín (2011).

2.2.4 Fluidos Newtonianos.

Domingo (2011), considera el caso en el que el movimiento de un fluido tiene lugar de forma bien ordenada, moviéndose éste en líneas paralelas, en lo que acabamos de denominar régimen laminar, teniéndose que las fuerzas de rozamiento son tangentes a la dirección del movimiento. Estas fuerzas de rozamiento presentan en general distintos comportamientos dependiendo de la rapidez con que varía la velocidad en la dirección perpendicular a la superficie, rapidez representada por $\frac{\partial v}{\partial n}$. Una situación muy frecuente se tiene cuando esta relación es de proporcionalidad, denominándose a los fluidos que satisfacen esta condición.

Así, en los fluidos newtonianos, las fuerzas de rozamiento que aparecen entre las capas de fluido en movimiento una con respecto a la otra, para una superficie de contacto dS , vienen dadas por la

$$dF_{roz} = \mu \frac{\partial v}{\partial n} dS \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

dF_{roz}: Diferencial de fuerza de rozamiento

Viscosidad dinámica

$\frac{\partial v}{\partial n}$: Rapidez

∂S : Diferencial de superficie

Que en función de la tensión cortante (fuerza por unidad de superficie) queda en la forma.

$$\frac{\partial F_{roz}}{\partial S} dS = \mu \frac{\partial v}{\partial n} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

dF_{roz} : Diferencial de fuerza de rozamiento

$\frac{\partial v}{\partial n}$: Rapidez

∂S : Diferencial de superficie

Conocida como $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial n}$. En esta expresión $\frac{\partial v}{\partial n}$ es la derivada que caracteriza la variación de la velocidad en la dirección transversal al movimiento y la constante de proporcionalidad es la μ o coeficiente de viscosidad dinámica que depende de las propiedades del fluido, indicando los signos negativos que se trata de una fuerza de rozamiento que se opone al movimiento. Las unidades de la viscosidad dinámica en el sistema internacional son $[\text{kgm}^{-1} \text{s}^{-1}]$ o $[\text{Nsm}^{-1}]$. Solamente los fluidos newtonianos, por ejemplo: agua, aire, Hg, productos petrolíferos típicos, etc, cumplen esta ley de Newton. Algunos ejemplos de fluidos no newtonianos son:

Fluidos biológicos.

Pinturas al aceite.

Soluciones coloidales.

Soluciones acuosas de combinados de gran masa molecular.

La ley de Newton, que en principio fue propuesta como hipótesis para una primera aproximación, está ampliamente comprobada experimentalmente en buen

número de fluidos y de hecho es la más usual en Mecánica de Fluidos cuando se quieren calcular tensiones tangenciales en el movimiento laminar de un fluido.

Se define la ν , y sus dimensiones en el m^2s^{-1} . La viscosidad cinemática no depende de las características dinámicas del fluido.

En los sistemas CGS e internacional las unidades de las viscosidades dinámicas y cinemática son, respectivamente. (Ver Figura 4).

	CGS	MKS
μ	$1 \text{ poise} = 1 \text{ dy}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2} = 1 \text{ g}/\text{cm}\cdot\text{s} = 10^{-1} \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$	$1 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ poises}$
ν	$1 \text{ stokes} = 1 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$1 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1} = 10^4 \text{ stokes}$

Figura 4. Tabla de Unidad de viscosidad Dinámica y Cinemática.

Fuente: Agustin Martin (2011).

2.2.5 Fluidos No Newtonianos.

Acabamos de ver que denominamos fluidos newtonianos a aquéllos en los que la dependencia entre las fuerzas de rozamiento y el perfil de velocidades es lineal. Sin embargo, no todos los fluidos tienen el mismo comportamiento, aunque la mayor parte de los gases y líquidos simples se comportan como fluidos newtonianos. Por ejemplo, pastas, lodos y polímeros de alta densidad son ejemplos de fluidos que no tienen un comportamiento newtoniano. Denominaremos fluidos no newtonianos o anómalos a aquellos fluidos que no siguen la ley de Newton del rozamiento interno.

El comportamiento de los fluidos no newtonianos se representa mediante las curvas de corriente, curvas reológicas o reogramas (ver figura 5), donde se representa la tensión cortante producida por las fuerzas de rozamiento frente a la tasa de variación de la velocidad en una sección . Estas curvas se construyen a partir de datos experimentales obtenidos con viscosímetros de distintos tipos en distintas condiciones de funcionamiento.

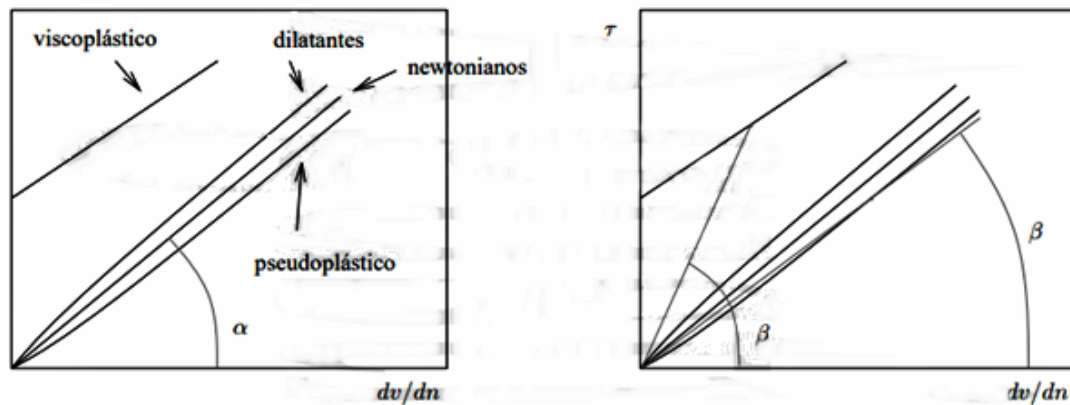


Figura 5. Reogramas para distintos tipos de fluidos.

Fuente: Agustín Martín (2011).

Las curvas de corriente correspondientes a los fluidos newtonianos son lineales y se representan en el diagrama por rectas que pasan por el origen de coordenadas, con la viscosidad igual a la pendiente de la recta.

$$\mu = \tan \alpha = \frac{\tau}{dv/dn} \quad \text{Ec. 4}$$

Que caracteriza completamente las propiedades reológicas del fluido a temperatura y presión dadas, con independencia del gradiente de velocidad.

Las curvas de corriente de los líquidos no newtonianos son muy diversas y en el caso general no lineales. Dependiendo del comportamiento de estos líquidos en el diagrama reológico se tienen distintos comportamientos no newtonianos:

Fluidos pseudoplásticos: En éstos, al aumentar la velocidad de variación de la velocidad la fuerza cortante viscosa aumenta menos que con los newtonianos (véase la figura). Un ejemplo de materiales pseudoplásticos son muchos lodos no newtonianos o fundidos de polímeros.

Fluidos dilatantes: Los fluidos dilatantes tienen el comportamiento contrario al de los fluidos pseudoplásticos. Muchas pinturas son fluidos dilatantes.

Las curvas de corriente de los fluidos pseudoplásticos y dilatantes se describen muy bien en régimen laminar mediante la expresión.

$$\tau = k (dv/dn)^n \quad \text{Ec. 5}$$

Donde η y n son magnitudes constantes para un líquido dado. n es una medida

que n representa el grado de comportamiento no newtoniano. Los fluidos newtonianos corresponden al caso particular $n = 1$, los fluidos pseudoplásticos al caso $n < 1$ y los dilatantes $n > 1$.

2.2.6 Definición de Presión.

La presión se define como la cantidad de fuerza ejercida sobre un área unitaria de sustancia. Esto se puede establecer con la ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

F= fuerza

A= Área

Blaise Pascal, un científico del siglo XVII, describió dos importantes principios acerca de la presión.

La presión uniformemente en todas direcciones sobre un pequeño volumen de fluido.

En un fluido confinado entre fronteras sólidas, la presión actúa perpendicularmente a la frontera.

Estos principios, en ocasiones llamados *principios de Pascal* como se puede observar en la figura 6.

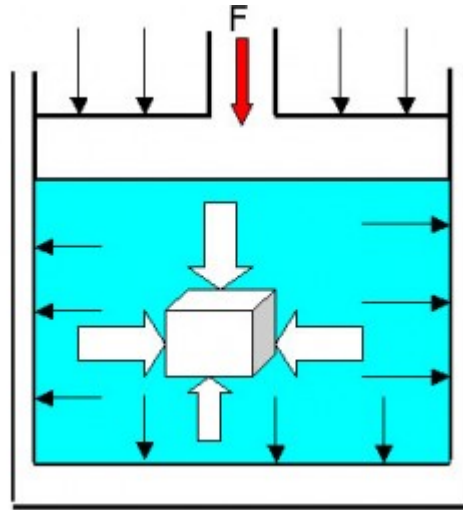


Figura 6. La presión actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido.

Fuente: Organización Neet Escuela (2015)

2.2.7 Número de Reynolds.

Resulta de gran interés conocer la influencia relativa de las fuerzas de inercia y viscosas en el movimiento del fluido y caracterizar esta influencia.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que surge a partir de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en las ecuaciones de Navier-Stokes.

El término de inercia $(\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v}$ es el asociado con la componente convectiva de la aceleración y dimensionalmente va como v^2 , mientras que el término viscoso $\nabla^2 \bar{v}$ es el asociado con la parte viscosa, y va dimensionalmente como v , siendo L y v una longitud y una velocidad característica respectivamente. Como ambos términos son dimensionalmente equivalentes, su cociente será una magnitud adimensional.

Así, se define el número de Reynolds en la forma:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} = \frac{\bar{v} D}{\nu} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde \bar{v} es la velocidad media característica del flujo, D es una longitud característica (típicamente el diámetro), ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad dinámica y ν es la viscosidad cinemática.

Se denomina velocidad característica a la velocidad por debajo de la cual toda turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad del fluido. Experimentalmente se observa que de forma aproximada para números de Reynolds menores que 2300 el régimen de movimiento del fluido es laminar (predominan las fuerzas de rozamiento) mientras que para números de Reynolds mayores que 2300 el régimen de movimiento es turbulento (predominan las fuerzas de inercia).

El régimen del flujo es laminar cuando el flujo tiene un movimiento ordenado, en el que las partículas del fluido se mueven en líneas paralelas, sin que se produzca mezcla de materia entre las distintas capas.

El régimen de movimiento de un fluido es turbulento cuando el fluido presenta un movimiento desordenado con mezcla intensiva entre las distintas capas.

El modelo de turbulencia empleado para el flujo multifásico es una generalización del modelo K – ε – sólo para la fase continua no teniendo en cuenta los efectos de la fase dispersa sobre la turbulencia de la fase continua.

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha k)}{\partial t} + (r_\alpha U_\alpha k) = \left(r_\alpha \frac{\mu_{eff\alpha}}{\sigma_k} k \right) + P_k \quad \alpha \quad \text{Ec. 8}$$

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha \epsilon)}{\partial t} + (r_\alpha U_\alpha \epsilon) = \left(r_\alpha \frac{\mu_{eff\alpha}}{\sigma_k} \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho_\alpha \epsilon) \quad \text{Ec. 9}$$

$$P_k = 2 \tau_t (\mathbf{u}) : (\mathbf{u}) \quad \text{Ec.10}$$

$$\tau_t^{eff} = \tau_t + \tau_l \quad \text{Ec.11}$$

$$\tau_l^{eff} = \tau_l \beta + \tau_l \tau_t^{eff} \quad \text{Ec.12}$$

$$\tau_t = C_\mu \rho_\alpha \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{Ec.13}$$

El modelo $k-\epsilon$ tiene cinco constantes, que garantizan la homogeneidad dimensional. Las cuales son:

$$C_{\mu} = 0,09; C_{\epsilon 1} = 1,44; C_{\epsilon 2} = 1,92; k = 1,0; \epsilon = 1,3$$

Si bien los modelos estándar de dos ecuaciones, como el modelo $k-\epsilon$ – buena predicción para muchos problemas de fluidos en ingeniería, existen otras aplicaciones para las cuales estos modelos pueden no ser los más adecuados. Entre estos se encuentran: Flujos con separación de capa límite, corrientes con cambios bruscos en la tasa promedio de los esfuerzos, flujos rotativos, flujos sobre superficies curvas.

Las principales ventajas e inconvenientes del modelo son las siguientes:

Ventajas:

Sólo se necesita fijar las condiciones iniciales y de contorno.

Resultados satisfactorios para una gran cantidad de flujos.

Es el modelo turbulento más ampliamente utilizado en la mayoría de flujos en aplicaciones industriales.

Se dispone de leyes de pared desarrolladas como condiciones de contorno para este tipo de modelos.

Inconvenientes:

Implementación más compleja que los modelos algebraicos debido a la introducción de dos ecuaciones diferenciales adicionales.

Pobres resultados en casos como: flujos no confinados, flujos con grandes gradientes longitudinales, flujos turbulentos completamente desarrollados en conductos no circulares.

2.2.8 Ecuación de Continuidad.

Consideremos un tubo de corriente estrecho, de forma que se pueda considerar uniforme la velocidad en cualquier sección del tubo perpendicular al flujo (Ver figura 7). Continuando con la obra de Agustín Domingo, en el interior del tubo la velocidad del flujo es paralela a la línea de corriente en cada punto, pudiendo ser estas velocidades distintas en cada punto. (Domingo, p.28).

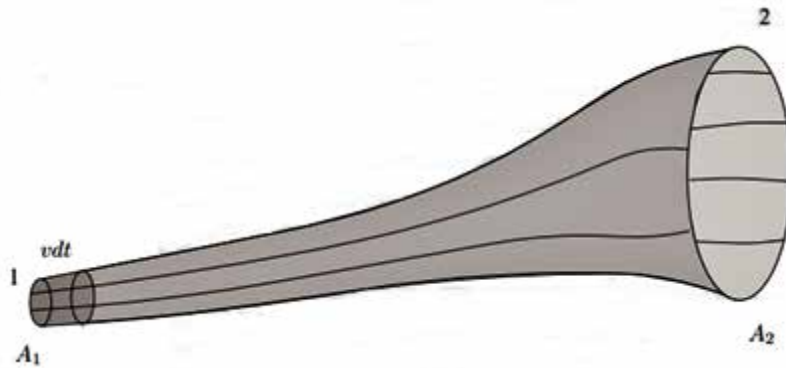


Figura 7. Tubo de corriente utilizando para la obtención de la ecuación de continuidad en forma integral.

Fuente: Agustín Domingo (2011).

Sea v_1 la velocidad de la partícula en el punto 1, y v_2 la velocidad de la partícula en el punto 2, con A_1 y A_2 las secciones transversales de los tubos, perpendiculares a las líneas de corriente. Si el tubo es estrecho v_1 y v_2 son uniformes en A_1 y A_2 respectivamente. En un intervalo de tiempo dt , un elemento del fluido recorrerá una distancia $v_1 dt$, por lo que en el tiempo dt pasará por A_1 la masa de fluido.

$$dm_1 = \rho_1 A_1 v_1 dt \quad \text{Ec. 14}$$

Donde ρ_1 es la densidad del fluido al pasar por la sección 1. El flujo de masa o caudal másico se define como la masa que atraviesa una sección en la unidad de tiempo, y viene dado por:

$$Qm = \frac{dm_1}{dt} = \rho_1 A_1 v_1 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde se considera implícitamente que en ese intervalo infinitesimal de tiempo ρ_1 ni A_1 ni v_1 varían apreciablemente en el recorrido del fluido $v_1 dt$. El caudal másico a través de la sección A_1 es $\rho_1 A_1 v_1$ y a través de la sección A_2 es $\rho_2 A_2 v_2$. Como

las partículas del flujo no pueden atravesar las paredes del tubo de flujo debe cumplirse que, si el régimen es permanente (o estacionario) y no hay fuentes ni sumideros de partículas, ambos caudales másicos han de ser iguales.

$$Qm = \rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad Qm = \rho A v = Cte \quad \text{Ec. 16}$$

Y análogamente para cualquier otra sección perpendicular al tubo de flujo, por lo que esta ley de conservación de la masa o ecuación de continuidad se puede escribir simplemente como:

$$\rho A v = Cte$$

A través de cualquier sección del tubo de flujo perpendicular al mismo en régimen estacionario.

punto y esta ecuación de continuidad puede escribirse como:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{Ec. 17}$$

$$Q = A v = Cte \quad \text{Ec. 18}$$

Donde Q es el caudal o volumen que atraviesa la sección en la unidad de tiempo. Por ejemplo, en una canalización por la que circula un fluido incompresible, se tiene la sencilla relación $S_1 v_1 = S_2 v_2$, que da, para la relación entre velocidades.

$$v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1 \quad \text{Ec. 19}$$

En todo el cálculo anterior hemos considerado implícitamente que la velocidad es uniforme en cada sección. Esto no es cierto en el caso general, pero la ecuación de continuidad sigue siendo válida en las mismas condiciones si la densidad es uniforme en la sección y en vez de la velocidad se utiliza la velocidad promedio en la sección.

$$v = \frac{1}{A} \int_A v dA = \pi r^2 \quad \text{Ec. 20}$$

2.2.9 Teorema de Bernoulli.

El teorema de Bernoulli está basado de la ley de conservación de la energía; que enuncia que la energía no se crea ni destruye, sólo se transforma de una forma en otra. (Ver figura 8). p37

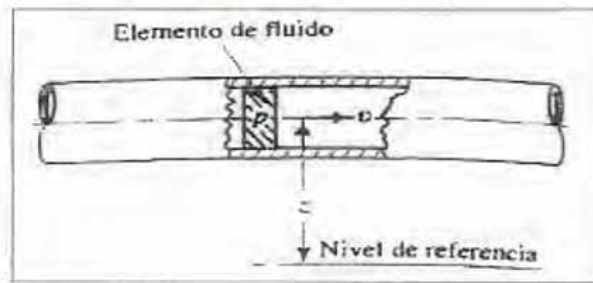


Figura 8. Elemento de fluido.

Fuente: Fernando jamil (2015)

Los medidores de flujos entran en contacto con el fluido dentro de la tubería. Cuando se analiza el flujo en tuberías se toman en consideración tres formas de energía; para el cual se considera un elemento de fluido dentro de una tubería en un sistema de flujo. Se localiza a cierta elevación Z , tiene velocidad promedio u y presión P . El elemento de fluido posee las formas de energía siguientes:

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

$$E_p = WZ \quad \text{Ec. 21}$$

Donde W es el peso del elemento.

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

$$E_c = Wu^2/2g \quad \text{Ec. 16}$$

Energía de flujo. A veces llamada energía de presión o trabajo de flujo, y representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de cierta sección contra la presión P . La energía de flujo se abrevia E_f y se calcula mediante;

$$E_f = WP/Y_p \quad \text{Ec. 22}$$

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

$$E = EF + Ep + E \quad \text{Ec. 23}$$

$$E = WP/Y_p + WZ + W u^2/2g \quad \text{Ec. 24}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía como el Newtonmetro (N.m) en el SI.

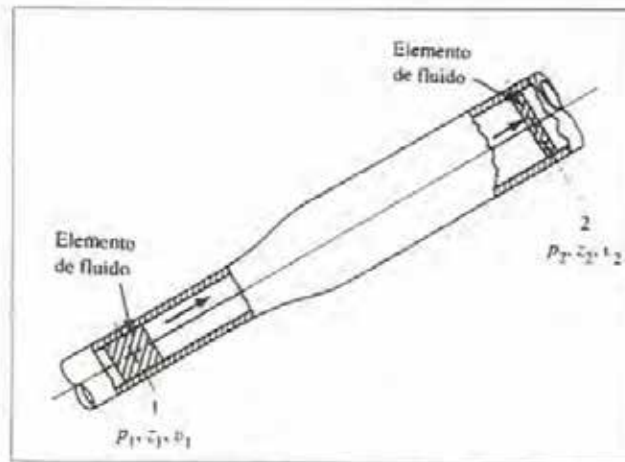


Figura 9. Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli

Fuente: Fernando jamil (2015)

Ahora, considere el elemento de fluido (ver figura 9), que se mueve de la sección 1 a la 2. Los valores de p y v son diferentes en las dos secciones. En la sección 1, la energía total es;

$$E_1 = \frac{WP_1}{Y_p} + WZ_1 + \frac{Wv_1^2}{2g} \quad \text{Ec.25}$$

En la sección 2, la energía total es;

$$E_2 = \frac{WP_2}{Y_p} + WZ_2 + \frac{Wv_2^2}{2g} \quad \text{Ec.26}$$

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

$$E_1 = E_2 \quad \text{Ec. 27}$$

$$\frac{WP_1}{Y_p} + WZ_1 + \frac{Wv_1^2}{2g} = \frac{WP_2}{Y_p} + WZ_2 + \frac{Wv_2^2}{2g}$$

El peso del elemento es común a todos los términos y se elimina al dividir entre él. Así, la ecuación se convierte en;

$$\frac{P_1}{\gamma_P} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_P} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 28}$$

Conocida como la Ecuación de Bernoulli.

Ecuación de conservación de momento.

Estudia la cantidad de movimiento de las partículas en un medio continuo, y se puede expresar de las siguientes maneras:

Forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \cdot V \cdot d + \int_{\partial\Omega} \rho V (V \cdot dSc) = \int_{\partial\Omega} \tau \cdot dSc + \int_{\Omega} \rho f d \quad \text{Ec.29}$$

Forma diferencial:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + (\rho V \cdot \nabla V) = \rho f + \nabla \cdot \tau \quad \text{Ec.30}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante relacionado a la velocidad de deformación, de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \left(\nabla V + (\nabla V)^T \right) - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot V \quad \text{Ec.31}$$

La variable f es la resultante de las fuerzas volumétricas externas que afectan a cada partícula (gravedad, fuerzas electromagnéticas, fuerzas de Coriolis, fuerza centrífuga, etc.)

2.2.10 Coeficiente de Descarga.

Según Freddy López (2016), el Coeficiente de Descarga, factor empírico obtenido experimentalmente, de ajuste sin dimensiones que compensa la distribución de velocidad y las pérdidas de carga menores que no fueron tomadas en cuenta al obtener la ecuación del gasto; su valor se determina para cada dispositivo.

Se utiliza la ecuación de Reader-Harris/Gallagher, establecida en la norma ISO 5167.

$$Cd = 0,5961 + (0,0261\beta^2) (0,216\beta^8) + 0,000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re}\right)^{0,7} + (0,0188 + (0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,3} + (0,043 + (0,08e^{-10L1}) (0,123e^{-7L2})) (0,11A) \left(\frac{\beta^4}{1-\beta^4}\right) 0,031(M_2 (0,8M_2^{1,1})\beta^{1,3} \quad \text{Ec.32}$$

Donde:

: Relación de diámetros.

Re: Número de Reynolds.

$L1=11D$ es la relación que existe entre la distancia desde el plano de las tomas de presión aguas arriba hasta la cara aguas arriba de la placa de orificio y el diámetro de la tubería.

$L2=12D$ es la relación que existe entre la distancia desde el plano de las tomas de presión aguas abajo hasta la cara aguas abajo de la placa de orificio y el diámetro de la tubería.

En general,

Para tomas en las esquinas $L1=L2=0$

Para tomas D y $D/2$ en las esquinas $L1=1$; $L2=0.47$

Para tomas en las bridas $L1=L2=25.4/D$

Ec.33

Por último, A se determina de la siguiente ecuación:

$$A = \left(\frac{19000 \beta}{Re} \right)^{0,8} \quad \text{Ec. 34}$$

Mientras que M_2 se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_2 = \left(\frac{2 L^2}{1-\beta} \right) \quad \text{Ec. 35}$$

En la figura 10, se muestra el comportamiento típico de la curva de Cd versus Re para una Placa Orificio validado por la norma ISO 5167.

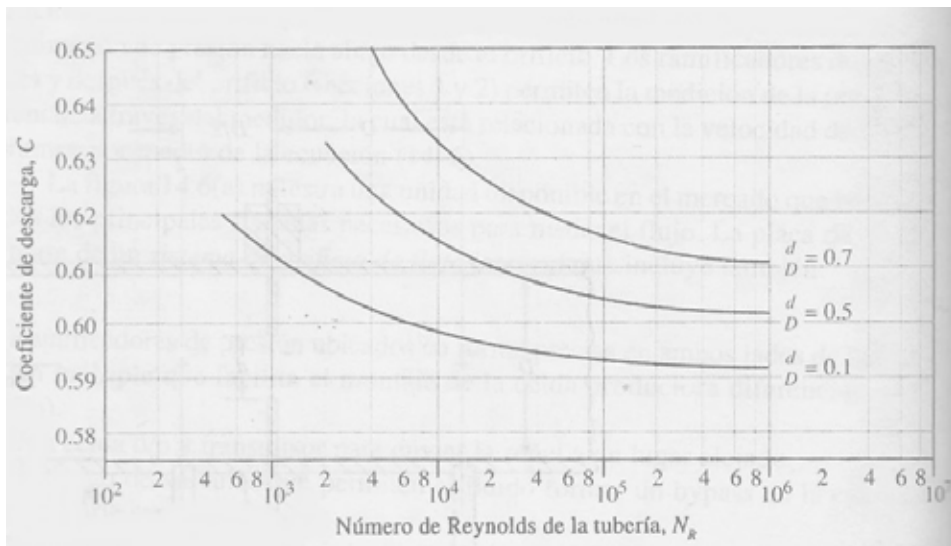


Figura 10. Gráfica típica de Cd vs Re en una Placa Orificio.

Fuente: Mecánica De Fluidos Aplicada Robert Mott 4^{ta} Edición.

Según la norma ISO 5167, tenemos la siguiente ecuación para calcular el coeficiente descarga:

$$Cd = 0,995 \sqrt{0,00653\beta} \sqrt{\frac{10^6}{Re(D)}} \quad \text{Ec. 36}$$

Dónde:

= Relación de diámetros.

Re(D)= Número de Reynolds, dependiendo del diámetro.

También se puede calcular el Cd de un Tubo Venturi e incluso una Placa orificio conociendo las presiones (p_1 y p_2) y la v_2 a partir de la siguiente ecuación.

$$v_2 = Cd \sqrt{\frac{2g(p_1-p_2)}{\frac{\gamma}{1-(\frac{A_2}{A_1})^2}}} \quad \text{Ec.37}$$

Donde: $P = P_1 \quad P_2$

Mientras que, en la figura 11, se muestra el comportamiento típico de la curva de Cd vs Re para los Tubo Venturi, curva que ha sido elaborada a través de varios ensayos experimentales en este tipo de medidor de flujo y validado por la norma ISO 5167.

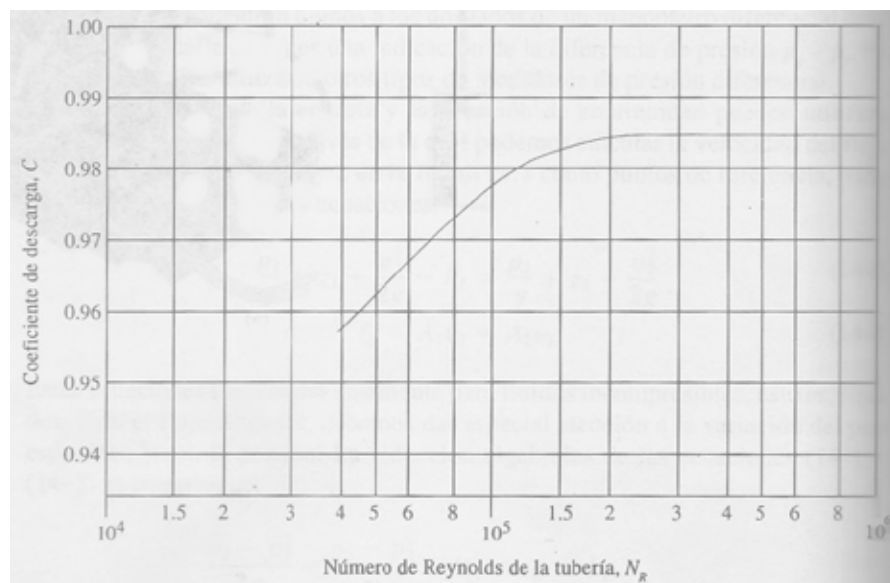


Figura 11. Gráfica típica de Cd vs Re en un Tubo Venturi.

Fuente: Mecánica De Fluidos Aplicada Robert Mott 4^{ta} Edición.

2.2.11 Medidores de Flujos.

La medición de flujo en los procesos industriales se hace necesaria por dos razones principales:

Para determinar las proporciones en masa o en volumen de los fluidos introducidas en un proceso.

Para determinar la cantidad de fluido consumido por el proceso con el fin de computar costos.

El flujo de fluidos en tuberías cerradas se define como la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal de la tubería por unidad de tiempo. Esta cantidad de fluido se puede medir en volumen o en masa. De acuerdo a esto se tiene flujo volumétrico o flujo másico

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen de fluido, bien sea directamente (desplazamiento) o indirectamente (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino). Los medidores de flujos volumétricos se basan en diferentes principios entre ellos se pueden hallar los diferentes equipos (sensor) de medición. (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Tabla Principios y tipos de medidores de flujos
Fuente: Jiménez, León (2018)

PRINCIPIOS	TIPO DE SENSOR
PRESION DIFERENCIAL	PLACA ORIFICIO TOBAERA DE FLUJO TOBERA VENTURI TUBO DE VENTURI TUBO DE DALL CUÑA DE FLUJO TUBO DE PITOT TUBO DE ANNUBAR
AREA VARIABLE	ROTÁMETRO CILINDRO Y PISTÓN
VELOCIDAD	TURBINA ULTRASONICO
FUERZA	PLACA DE IMPACTO
TENSION INDUCIDA	MEDIDOR MAGNETICO
DESPLAZAMIENTO POSITIVO	DISCO GIRATORIO POSTON OSCILANTE PISTON ALTERNATIVO MEDIDOR ROTATIVO: CILOIDAL, BIRROTOR, OVAL, PALETA
TORBELLINO	FRECUENCIA ULTRASONICO CAPACITANCIA

2.2.12 Placa Orificios.

La placa de orificio es en un disco con un orificio concéntrico, excéntrico ó segmentado y se coloca perpendicular a la tubería. El diámetro exterior es igual al espacio interno que existe entre los tornillos de las bridas del montaje. El diámetro exterior es igual al espacio interno que existe entre los tornillos de las bridas del montaje. El espesor del disco depende del tamaño de la tubería y la temperatura de operación. Son los elementos primarios de caudal más utilizados en la industria según Chassan Jalloul, Manager en Marketing de Instrumentos en WIKA, fabricantes de estos dispositivos, ya que ofrecen una solución económica y robusta para aplicaciones con un turn down hasta 4:1 y no requieren calibraciones periódicas. Para instalar una placa de orificio, se utilizan bridas de medición en lugar de las bridas convencionales, donde los puntos de toma de presión se mecanizan por parejas en la brida, lo que elimina la necesidad de soportes en la placa o conexiones en la pared del tubo.

Cuando el fluido pasa a través de la placa de orificio, disminuye su presión hasta que alcanza su mínimo en un área denominada “vena contracta”. En este punto se obtiene el valor mínimo de presión y la máxima velocidad. Luego la presión vuelve a incrementarse, pero ya no recupera su valor anterior debido a pérdidas causadas por turbulencias y fricciones. La diferencia de presión que ocasiona la placa de orificio permite calcular el caudal. (Ver figura 12). Wika Blog 2018.

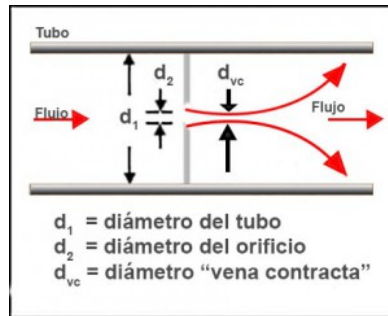


Figura 12. Esquema de cómo se comporta una placa orificio
Fuente: WIKA Blog

La norma ISO 5167-1 establece los principios generales para los métodos de medida y los requisitos básicos referentes a características geométricas, reglas para la instalación y operación. Las placas de orificio son óptimas para aplicaciones en estas condiciones:

Temperatura máxima de servicio hasta 800 °C -, Presión máxima de trabajo hasta 400 bar

Aptos para medición de líquidos, gases y vapor de agua

Precisión $\pm 0,5$ % del caudal efectivo o máximo

Repetibilidad de la medición 0,1 % Tipos de placas de orificio Básicamente existen cuatro versiones de placas para distintas aplicaciones.

Placas de orificio concéntricas de arista viva (versión estándar).

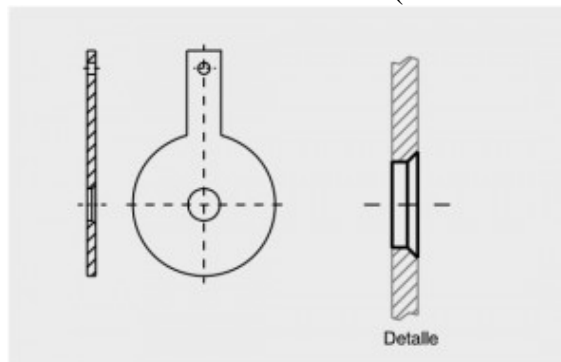


Figura 13. Placas de orificio concéntricas de arista viva (versión estándar)
Fuente: WIKA Blog

Esta versión está prevista para aplicaciones universales en fluidos y gases limpios. (Ver Figura 13).

Placas de orificio concéntricas cuarto de círculo y cónicas

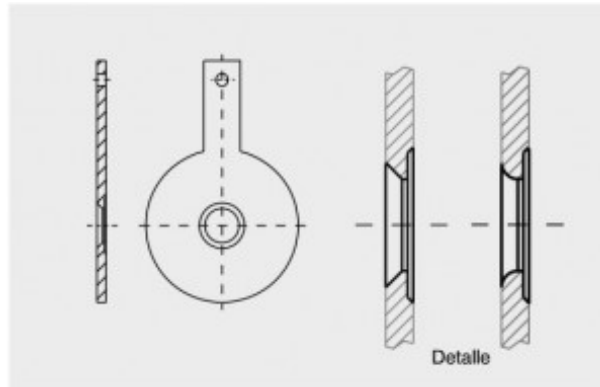


Figura 14. Placas de orificio concéntricas cuarto de círculo y cónicas

Fuente: WIKA Blog

Placas concéntricas cuarto de círculo y cónicas son la mejor elección en la medición de fluidos con bajo número de Reynolds. (Ver Figura 14).

Placas de orificio excéntricas

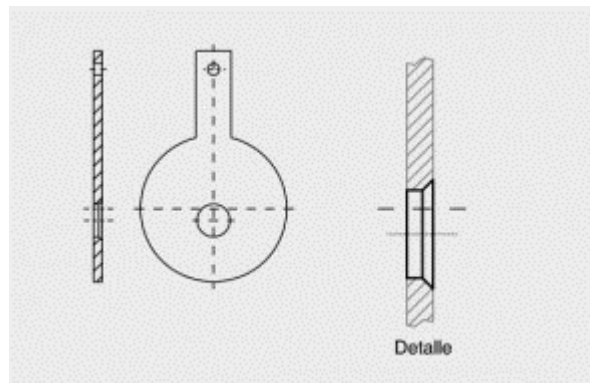


Figura 15. Placas de orificio excéntricas.

Fuente: WIKA Blog

Las placas excéntricas se aplican en tubos de diámetro reducido. (Ver Figura 15).

Placas de orificio concéntricas segmentadas

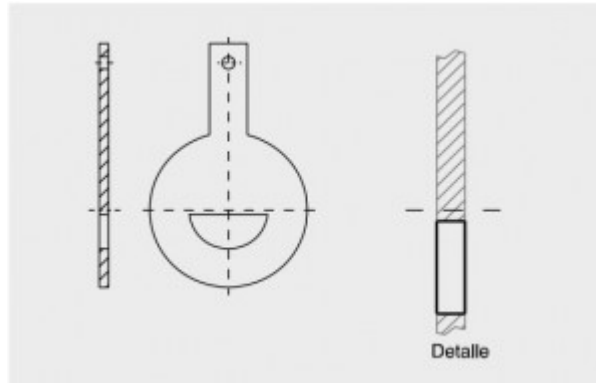


Figura 16. Placas de orificio concéntricas segmentadas

Fuente: WIKA Blog

Placas concéntricas segmentadas para la medición en medios bifásicos, sucios y medios que contienen partículas. (Ver Figura 16).

La norma ISO 5167, determina la geometría y el método de empleo, es decir, las condiciones de funcionamiento e instalación de las placas de orificio, cuando se instala en una tubería en carga. Además, esta norma especifica la información previa para calcular el caudal, siendo aplicable junto con los requisitos dados en la norma ISO 5167-1.

Constantes predeterminadas

Temperatura ambiente

Viscosidad cinemática del agua

Relación de diámetros:

Conforme a lo indicado en el apartado 5.1.8.1 de la norma ISO 5167-2(2003), para que el cálculo sea correcto se deben cumplir las siguientes condiciones:

$d \geq 12.5\text{mm}$

$0.10 \leq \beta \leq 0.750$

Descripción del método de cálculo:

Según se describe en el apartado 4 de la norma ISO 5167-2 (2003), el cálculo del caudal se basa en que la presencia de una placa de orificio, en el interior de una tubería

por la que circula un fluido, origina una diferencia de presión estática entre los dos lados de la placa.

El caudal a través de un orificio se determina mediante la ecuación:

$$q = CdA\sqrt{2g P} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

q: es el caudal (m³/s)

Cd: es el coeficiente de descarga (adimensional)

g: es la gravedad (m/s²)

: es la caída de presión en el orificio (m)

A: es la superficie del orificio (m²)

El caudal másico, qm puede determinarse utilizando la siguiente ecuación:

$$qm = \frac{C}{(1-\beta^4)^{1/4}} \frac{\pi}{4} d^2 (2 P \rho) \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

C: es el coeficiente de descarga (adimensional)

: es la relación de diámetros (adimensional)

: es la diferencia de presión entre ambos lados de la placa de orificio

El caudal volumétrico se podría determinar de la siguiente forma:

$$qm = qv \times \rho \quad \text{Ec. 40}$$

De esta manera:

$$qv \times \rho = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 (2 P \rho)^{1/2}$$

Teniendo en cuenta que las pérdidas de carga en el orificio son proporcionales al cuadrado del caudal:

$$\Delta P = kq^2v \quad \text{Ec. 41}$$

$$qv \times \rho = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 (2kq_v^2 \rho)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 42}$$

$$1 = \frac{c}{(1-\beta^4)^{1/2}} \frac{\pi}{4} \beta^4 D^2 \sqrt{\frac{2gk}{\gamma}} \quad \text{Ec. 43}$$

De esta ecuación se obtiene q_v , donde ρ es la densidad del fluido a la temperatura y presión establecida, k es la pérdida de carga en el orificio y γ es el peso específico del agua

Límites de empleo del procedimiento.

Para que los resultados obtenidos mediante este procedimiento de cálculo se puedan considerar válidos, hay que tener en cuenta lo indicado en la norma ISO 5167:

d 12.5mm

$$50 \leq D \leq 1000 \quad \text{Ec. 44}$$

$$Re \geq 5000 \quad \text{Ec. 45}$$

Coefficiente de descarga.

Recordando la ecuación 22, el coeficiente de descarga se calcula para placas de orificio, según la norma ISO-5167, mediante la ecuación de Reader-Harris/Gallagher:

$$\begin{aligned} Cd = & 0,5961 + (0,0261\beta^2) \left((0,216\beta^8) + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re} \right)^{0,7} + (0,0188 \right. \\ & \left. + (0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,3} \right. \\ & \left. + (0,043 + (0,08e^{-10L1}) - (0,123e^{-7L2})) (1 - 0,11A) \left(\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right) \right. \\ & \left. + 0,031 (M_2 - (0,8M_2)^{1,1}) \beta^{1,3} \right) \end{aligned}$$

Cuando $D < 71.12\text{mm}$, además se debe aplicar el siguiente término,

$$+ 0.011(0.75 - \beta) (2.8 - D / (25.4)) \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

Relación de diámetros

Re es el número de Reynolds conforme a la siguiente ecuación,

$$Re = (V \times D) / \nu \tag{Ec. 47}$$

Donde.

V es la velocidad del fluido (m/s)

D es el diámetro interno de la tubería (m)

ν es la viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

Sin embargo, ésta es la pérdida de carga que se produce en el propio orificio. Sin embargo, parte de esta pérdida de carga se recupera posteriormente, con lo que si queremos averiguar la pérdida de carga real producida por un disco de orificio tendremos que tener en cuenta este efecto. (Ver Figura 17).

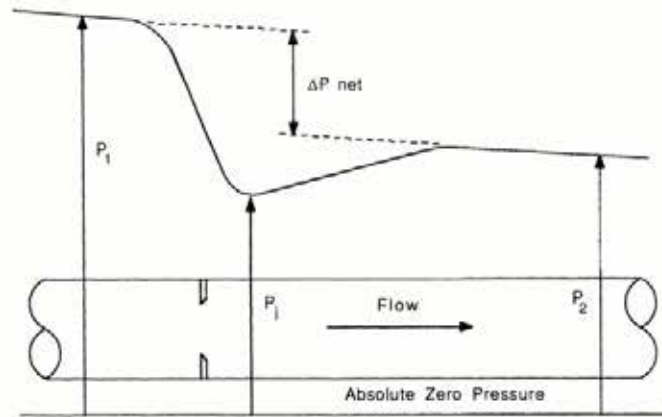


Figura 17. Diagrama de pérdida de carga en una placa orificio

Fuente: Lorenzo Carbonell

De esta forma, la pérdida de carga total, se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{net} = \Delta P \sqrt{(1 - \beta^2(1 - C^2))^2 / \sqrt{(1 - \beta^2(1 - C^2)) + C^2}} \tag{Ec.48}$$

Donde ΔP está calculado a partir de la medida de presión en D y D/2, tomando los valores L1=1; L2=0.47

2.2.13 Tubo Venturi.

En Viewport (2016), dice que Un tubo de Venturi es un dispositivo inicialmente diseñado para medir la velocidad de un fluido aprovechando el efecto Venturi. Efectivamente, conociendo la velocidad antes del estrechamiento y midiendo la diferencia de presiones, se halla fácilmente la velocidad en el punto problema. La aplicación clásica de medida de velocidad de un fluido consiste en un tubo formado por dos secciones cónicas unidas por un tubo estrecho en el que el fluido se desplaza consecuentemente a mayor velocidad. La presión en el tubo Venturi puede medirse por un tubo vertical en forma de U conectando la región ancha y la canalización estrecha. La diferencia de alturas del líquido en el tubo en U permite medir la presión en ambos puntos y consecuentemente la velocidad. (Ver Figura 18).

En otros casos utiliza este efecto para acelerar la velocidad de un fluido obligándolo a atravesar un tubo estrecho con el extremo en forma de cono. Estos modelos se utilizan en numerosos dispositivos en los que la velocidad de un fluido es importante y constituyen la base de aparatos como el carburador. Cuando se utiliza un tubo de Venturi hay que tener en cuenta un fenómeno que se denomina. Cavitación. Este fenómeno ocurre si la presión en alguna sección del tubo es menor que la presión de vapor del fluido. Para este tipo particular de tubo, el riesgo de cavitación se encuentra en la garganta del mismo, ya que aquí, al ser mínima el área y máxima la velocidad, la presión es la menor que se puede encontrar en el tubo. Cuando ocurre la cavitación, se generan burbujas localmente, que se trasladan a lo largo del tubo. Si estas burbujas llegan a zonas de presión más elevada, pueden colapsar produciendo así picos de presión local con el riesgo potencial de dañar la pared del tubo.

A mayor presión menor velocidad y a menor presión mayor la velocidad

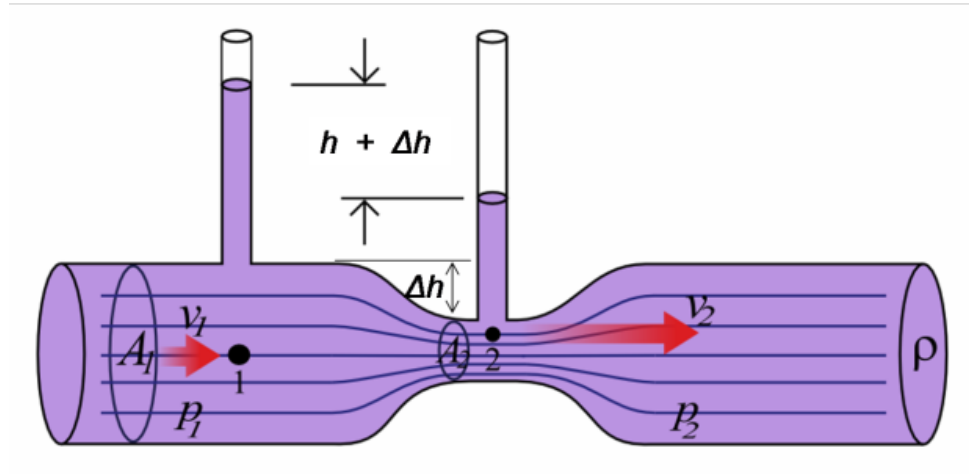


Figura 18. Tubo Venturi

Fuente: Física de fluidos y Termodinámica

Ventajas:

Alta exactitud, del orden de $\pm 0,75\%$

El mantenimiento que requiere es mínimo.

La caída de presión es pequeña, permitiendo la medición de flujos 60% mayores que los de la placa de orificio con la misma restricción.

Se puede usar en la medición de grandes flujos.

Desventajas:

Alto costo: El costo de fabricación de un tubo de Venturi es alrededor de 20 veces de una placa de orificio que se use para medir el mismo flujo.

Dificultad en la instalación.

Sus aplicaciones como medidor de caudal y de aceleración de fluidos son similares a las de la tobera.

Se recomienda el uso de tubo Venturi cuando el fluido contiene grandes cantidades de sólidos en suspensión o corrientes de flujo sucias, gracias a su entrada lisa.

Hidráulica: La depresión generada en un estrechamiento al aumentar la velocidad del fluido, se utiliza frecuentemente para la fabricación de máquinas que proporcionan aditivos en una conducción hidráulica. Es muy frecuente la utilización de este efecto “Venturi” en los mezcladores del tipo Z para añadir espumógeno en una conducción de agua para la extinción.

Motor: el carburador aspira el carburante por efecto Venturi, mezclándolo con el aire (fluido del conducto principal), al pasar por un estrangulamiento.

Neumática: Para aplicaciones de ventosas y eyectores.

Aeronáutica: Interviene en efectos relacionados con la viscosidad del aire que pueden explicarse con las Ecuaciones de Navier-Stokes. Además, se utiliza un tubo Venturi para proveer succión a los instrumentos que trabajan con vacío, (Coordinador de giro, Horizonte artificial, etc.) en los aviones que no están provistos de bombas mecánicas de vacío. Aunque el efecto Venturi se utiliza frecuentemente para explicar la sustentación producida en alas de aviones, este efecto realmente no puede explicar la sustentación aérea, pues un perfil alar no actúa como un tubo de Venturi acelerando las partículas de aire: las partículas son aceleradas debido a la conservación de la energía (se explica mediante el principio de Bernoulli, en virtud del cual el aire adquiere mayor velocidad al pasar por la región convexa del ala de un avión), la conservación del momento (se utiliza la tercera ley de Newton para su explicación) y de la masa (se utilizan las Ecuaciones de Euler).

Hogar: En los equipos ozonificadores de agua, se utiliza un pequeño tubo Venturi para efectuar una succión del ozono que se produce en un depósito de vidrio, y así mezclarlo con el flujo de agua que va saliendo del equipo con la idea de destruir las posibles bacterias patógenas y de

desactivar los virus y otros microorganismos que no son sensibles a la desinfección con cloro.

Acuarofilia: En las tomas de bombas de agua o filtros, el efecto Venturi se utiliza para la inyección de aire y/o CO₂.

Cardiología: El efecto Venturi se utiliza para explicar la regurgitación mitral que se puede dar en la miocardiopatía hipertrófica, y que es causa de muerte súbita en deportistas. La explicación es que el movimiento sistólico anterior (MSA) que realiza la valva anterior de la válvula mitral, se produce porque la hipertrofia septal y el estrechamiento del tracto de salida provocan una corriente de alta velocidad sobre la v. mitral, que debido al efecto Venturi, succiona el extremo de la valva anterior contra el septo, que impide la salida de sangre, por lo que regurgita hacia la aurícula izquierda.

Neumología: El efecto Venturi se utiliza en máscaras para la administración de concentraciones exactas de oxígeno, para controlar la FiO₂; se denominan máscaras de Venturi o Ventimask. El oxígeno al 100% suministrado durante cierto periodo de tiempo es tóxico, por lo que se mezcla con aire externo cuya concentración de oxígeno es del 21%, de modo que en función de la cantidad de aire que se mezcle con el oxígeno al 100%, la concentración de oxígeno será mayor o menor, normalmente se suministra entre un 26%-50%. El oxígeno puro al pasar por el conducto con un calibre menor, se produce el efecto Venturi, se genera una presión negativa que permite la entrada del aire procedente del exterior a través de unos orificios circundantes, dependiendo del tamaño de los orificios, entra más o menos aire y por tanto menor o mayor concentración de oxígeno que finalmente el paciente recibirá.

Odontología: el sistema de aspiración de saliva en los equipos dentales antiguos utilizaba tubos finos Venturi. Ahora la aspiración está motorizada.

2.2.14 Dinámica de Fluidos Computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta que modela matemáticamente la solución de las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía de un fluido. El reciente avance en la capacidad computacional junto con la diversidad de software existente ha situado al CFD como una técnica viable para aportar soluciones eficaces y eficientes del diseño de productos.

El CFD se ha convertido actualmente en una poderosa herramienta dentro del sector industrial, con cada solución se representa un vasto panorama de la física matemática, métodos numéricos, interfaces de usuarios y técnicas de visualización. Tan grande ha sido el impulso para propulsar el CFD que se usa ahora tanto como los tradicionales métodos didácticos experimentales y análisis de modelos como para resolver problemas de flujo de fluidos. Esta reciente adopción del CFD ha sido a la vez inevitable y a la vez progresiva, pues los altos costos y el tiempo asociados con el consumo de la experimentación a menudo han impedido el deseo de producir eficiente profundidad en los resultados. La dinámica de fluidos computacional o simplemente CFD está relacionada con la obtención de la solución numérica de problemas de flujo de fluidos utilizando sistemas de cómputo.

Ojeda Escoto Pedro, López Parra Marcelo, Farah Simón Alejandro, Ramírez Reivich Alejandro. Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológico. Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2009. Realizaron un artículo basado en CFD como una herramienta para diseño de productos. Es esta parte habla sobre la dinámica de fluido computacional, como ya explicado es una herramienta que modela matemáticamente la solución de las ecuaciones fundamentales del flujo de

fluidos El CFD se ha convertido actualmente en una poderosa herramienta, con cada solución se representa un vasto panorama de la física matemática, métodos numéricos, interfaces de usuarios y técnicas de visualización.

2.2.15 Fundamentos de CFD.

Las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos se consideran como formulaciones de las leyes de la conservación de la Mecánica de Fluidos y se conocen como ecuaciones de Navier–Stokes. Cuando se aplican a un fluido continuo, estas leyes de la conservación relacionan el rango de cambio de una propiedad de un líquido deseado a fuerzas externas que se

Consideran como:

- a) La ley de la conservación de la masa (Continuidad).
- b) La ley de la conservación de momento (Segunda ley de movimiento de Newton).
- c) La ley de la conservación de energía (Primera ley de la termodinámica).
- d) Haciendo cumplir estas leyes de conservación sobre volúmenes espaciales discretos en un dominio fluídico, es posible alcanzar un cálculo consecuente de los cambios en la masa, momento y energía del flujo que cruza las fronteras del volumen en estudio.

Las ecuaciones resultantes se escriben como:

La ecuación de conservación de masas es;

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (pp_i) = 0 \quad \text{Ec. 49}$$

La ecuación de conservación momentánea se describe como:

$$V_{u2} = u \frac{v_a}{\tan\beta_2}, \frac{\partial pu_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (pp_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad \text{Ec. 50}$$

La conservación de la energía es la siguiente:

$$\frac{\partial pH}{\partial t} + \frac{\partial pu_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)) + q_i + \frac{\partial P}{\partial t} \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + p\varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad \text{Ec. 51}$$

Dónde,

U - Velocidad del fluido (m / s)

P - Densidad del fluido (kg / m³)

S_i - Fuerza externa por unidad de masa de flotabilidad

H - Entalpía térmica (J / kg)

QH - Fuente de calor por unidad de volumen (W / m³)

T_{ij} - Tensión de corte viscoso (Pa)

TR - tensión de corte de Reynolds (Pa)

Q_i - Flujo de calor difusivo (W)

$H = h + u^2/2$

2.2.16 Simulación en CFD.

La generación de un modelo tridimensional CAD de la geometría del dominio fluídico es el primer paso para una simulación en CFD. El sólido debe mantener la geometría inicial y las características y propiedades relevantes para capturar el flujo, se puede pasar por alto detalles que a nivel de fabricación serían esenciales, pero desde el punto de vista de los procesos físicos que ocurren se considera de nula importancia.

2.2.16.2 Mallado del dominio o discretización espacial.

La discretización del dominio fluido en pequeñas celdas llamadas elementos o volúmenes finitos es la segunda etapa. La forma de estos puede ser variada (tetraédrica, hexaédrica, prismáticas, etc.). Existen muchos métodos para la discretización del problema. Todos estos métodos requieren una previa discretización geométrica (espacial) para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Básicamente, existen dos tipos de mallados.

Cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices i, j, k , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D. La principal ventaja de los mallados estructurados reside en la ordenación de

los elementos en memoria, ya que, de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Las mallas estructuradas pueden representar en un sistema cartesiano o curvilíneo. En el primer caso las líneas que configuran la celda son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados, por contrario, en los sistemas curvilíneos el sistema de coordenada es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio.

Por otro lado, también pueden clasificarse en mallas ortogonales y en malla no ortogonales. Las mallas octogonales son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90° .

Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas y nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso. Son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D. la principal ventaja de los mallados no estructurados reside en que los triángulos (2-D) o los tetraedros (3-D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica son necesarios unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla. El tiempo requerido para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere que el que requiere para uno estructurado. (Ver Figura 19).

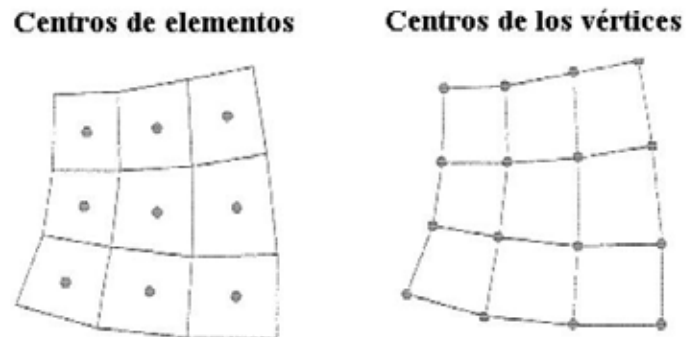


Figura 19. Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices.

Fuente: Física de fluidos y Termodinámica

Calidad de la malla.

Usar una malla con una adecuada calidad es una parte importante para controlar los errores de discretización. La calidad de la malla puede ser medida mediante el cálculo de tres valores principalmente como lo son:

Mesh orthogonality (Ortogonalidad de la malla)

El concepto de malla ortogonal se refiere al ángulo entre caras de elementos adyacentes o el ángulo entre ejes de elementos adyacentes, estén cerca de su ángulo óptimo (por ejemplo, 90° para cuadrilátero y los 60° para elementos de caras triangulares). La medida más relevante de la ortogonalidad de la malla, se ilustra a continuación. Se trata del ángulo entre el vector que une a dos (volumen de control) nodos (s) y el vector normal en cada punto de integración de superficie (n) asociados con el borde. (Ver figura 20)

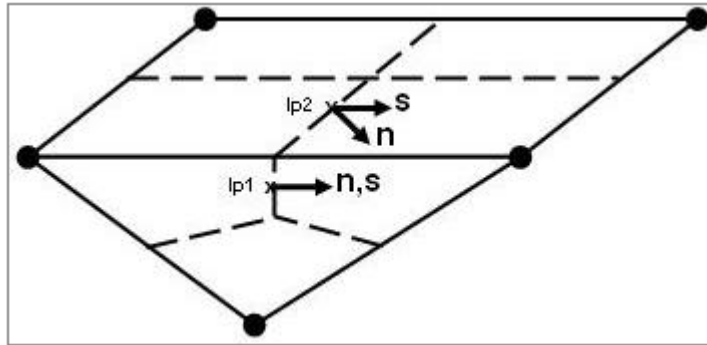


Figura 20. Mesh ortogonalidad
Fuente: ANSYS-CFX. Release 11.0. (2007).

El Mínimo Angulo de Ortogonalidad aceptable es 20°

Mesh expansion factor (Factor de expansión de la malla)

Este factor se refiere a la mayor tasa de cambio de volumen entre volúmenes de control adyacentes. Y se calcula de manera aproximada relacionando el radio máximo con el radio mínimo de volúmenes de control adyacentes. El “Mesh expansión factor” recomendado para las aplicaciones es 21. (Ver figura 21)

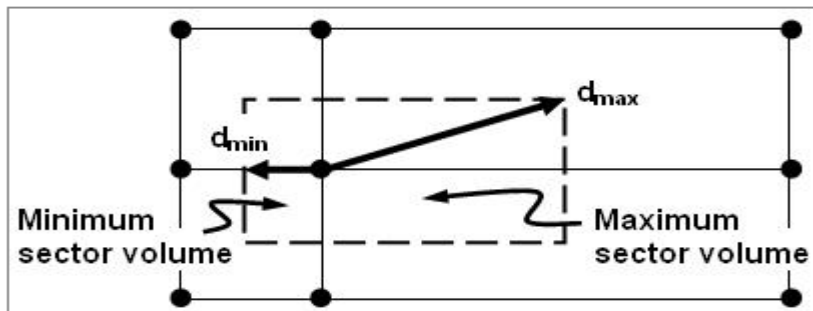


Figura 21. Mesh expansion factor
Fuente: ANSYS-CFX. Release 11.0. (2007).

Mesh aspect ratio (Aspecto del radio de la malla)

El concepto de “Mesh Aspect Ratio” estudia los elementos de la malla a medida que estos se van estrechando en mayor medida y envuelve la relación entre la máxima distancia y la mínima área adyacentes a cada nodo a través de todo el dominio. Como se ilustra en la figura 22, un rango aceptable de “Mesh Aspect Ratio” sería < 100 . (Ver figura 22)

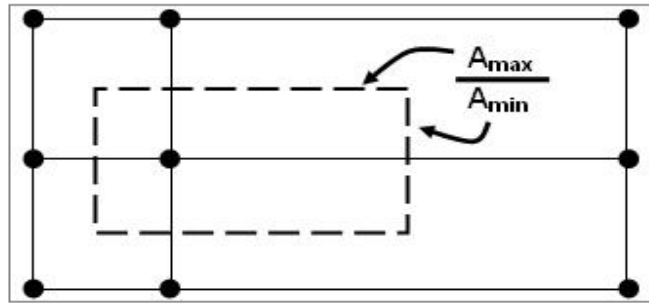


Figura 22. Mesh aspect ratio.
Fuente: ANSYS-CFX. Release 11.0. (2007).

Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía se resuelven en cada uno de los elementos de la malla. Puesto que las ecuaciones son en derivadas parciales, previamente hay que convertirlas en ecuaciones algebraicas (introduciendo errores numéricos de discretización) utilizando esquemas numéricos adecuados. Así se pasa de tener un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales sobre un espacio continuo (x, y, z, t) a un sistema finito de ecuaciones algebraicas con variables independientes discretas $(x[i], y[i], z[i], t[j])$. El número de ecuaciones a resolver es muy elevado. En los pasos intermedios de discretización aparecen errores numéricos, además de los de redondeo debido al uso de un número finito de decimales, que deben tender a cero si se quiere que la solución numérica se asemeje a la real. Asociados a la cuantificación de errores se encuentran los conceptos de verificación y validación de los cálculos.

Se llama verificación del modelo a la comprobación de que las ecuaciones se están resolviendo de manera adecuada. Esto poco tiene que ver con la física y es solo una cuestión de cálculo numérico. La validación del modelo, por otro lado, consiste en determinar lo apropiado de usar las ecuaciones que realmente se resuelven como aproximación del modelo matemático del fenómeno físico.

Según Guillén Arturo (2016), los criterios de convergencia son los parámetros que se establecen como indicativos de que los resultados obtenidos son confiables y adaptados a la realidad física de funcionamiento del modelo a estudiar. Algunos criterios de convergencia son:

Criterio de convergencia al establecer es el número de iteraciones que el “Solver” realizará para encontrar la solución numérica de las ecuaciones de gobierno (continuidad y momento), el modelo de turbulencia y el de cavitación. Criterio de convergencia del valor de los residuos “Raíz Cuadrada Media”, RMS por sus siglas en inglés “Root Mean Squar”.

Criterio de convergencia “Timescale Control” el cual es un valor que rige cual será la escala de tiempo para que se resuelvan las ecuaciones, comúnmente para

angular en radianes por segundos; para esto se introduce una expresión para establecer el tiempo que se tardará entre cada iteración.

El Residuo llamado “Raíz Cuadrada Media” RMS, consiste en sumar todos los residuos del dominio, determinar la media de los residuos y por último calcular la raíz cuadrada de la media obtenida. Una medida de cuando bien converge la solución puede ser obtenida por el trazado de los residuos para cada ecuación al final de cada intervalo de tiempo de la simulación (iteración) o “TimeStep”. Para la determinación del valor de RMS razonable para evaluar la convergencia pueden tenerse en cuenta los siguientes lineamientos:

Valores por encima de 1×10^{-4} puedan ser suficientes para obtener una evaluación cualitativa del campo de flujo.

1×10^{-4} es una convergencia relativamente precisa, pero puede ser suficiente para

muchas aplicaciones de ingeniería.

1×10^{-5} representa una buena convergencia y usualmente suficiente para la

mayoría de aplicaciones de ingeniería.

1×10^{-6} o menor representa una convergencia bastante alta y es ocasionalmente requerida para problemas sensibles a la geometría. En muchos casos no es posible solución de ecuaciones de precisión simple.

Guillén, dice que este factor representa una relación adimensional entre la distancia del primer nodo a la pared y el esfuerzo cortante a la pared. Si el valor de Y^+ es muy grande, las condiciones de borde en la pared pueden que no representen fielmente la situación real, ya que no se resuelve completamente la capa límite. Su definición matemática se representa en la Ecuación 40.

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_t \mu}{\tau_w} \quad \text{Ec. 52}$$

Por lo general, los rangos deseados para este parámetro son:

$y^+ < 200$ Para los tratamientos de pared automáticos.

$y^+ < 5$ Cuando se utilizan funciones de pared

$y^+ < 1$ Cuando se utiliza modelos de bajo Reynolds.

Además, para A. Gullén (2016), resolver de manera numérica las ecuaciones de gobierno del problema a estudiar en este trabajo se tienen los siguientes pasos:

- a) Se elige un dominio computacional y se genera una malla (conocida también como red de nodos); este dominio se divide en muchos elementos pequeños llamados celdas. Para dominios de dos dimensiones (2D), las celdas son áreas, mientras que para dominios tridimensionales (3D) las celdas son volúmenes.

Un dominio computacional es la región en el espacio en la cual las ecuaciones de movimiento se resuelven mediante la CFD. Una celda es un subconjunto pequeño del dominio computacional. Los límites de un dominio bidimensional se denomina lados, y los límites de un dominio tridimensional se llaman caras.

- b) Se especifican las condiciones de frontera en cada lado del dominio computacional (flujos 2D) o en cada cara del dominio (flujos 3D).
- c) Se establece el tipo de fluido (agua, aceite, gasolina, entre otros), junto con las propiedades del fluido (temperatura, densidad, viscosidad, etc). La mayoría de los paquetes de CFD tienen integrada bases de datos de propiedades de fluidos.
- d) Se seleccionan los parámetros numéricos y los algoritmos de solución.
- e) Los valores de la primera aproximación para las variables del campo de flujo se especifican para cada celda. Estas son condiciones iniciales, que podrían ser correctas o no, pero son necesarias como punto de partida, para que la iteración pueda seguir.
- f) Al comenzar con los valores de la primera aproximación, las formas discretizadas de las ecuaciones de gobierno se resuelven por iteración, en el centro de cada celda. Un residuo se considera como una medida de la desviación de una solución numérica para determinada ecuación de conservación o transporte respecto a la solución exacta, se debe monitorear, el residuo promedio relacionado con cada ecuación de conservación o transporte para ayudar a determinar cuándo converge la solución. A veces se necesitan cientos, o hasta miles, de iteraciones para que converja la solución a una solución final.
- g) Cuando converge la solución, las variables del campo de flujo como la velocidad y la presión se trazan y analizan gráficamente. Los usuarios pueden definir y analizar otras funciones particulares que se forman mediante combinaciones algebraicas de variables de campo de flujo. La mayoría de los paquetes de CFD tienen integrados post- procesadores, diseñados para analizar el campo de flujo de manera gráfica y rápida, también hay paquetes post-procesadores autónomo.
- h) Las propiedades globales del campo de flujo, como la caída de presión, las propiedades integrales, como las fuerzas (de sustentación y de

arrastre), las torques que actúan sobre un cuerpo, se calculan a partir de la solución que se obtiene por convergencia. Con la mayoría de los paquetes de CFD esto puede hacerse “sobre la marcha” a medida que proceden las iteraciones, en numerosos casos, de hecho, es aconsejable monitorear estas cantidades junto con los residuos durante el proceso de iteración, cuando converge una solución, las propiedades globales e integrales deben establecerse en valores constantes también.

Regularmente, al análisis y post proceso de los resultados se le da una menor importancia de la que realmente tienen. Una vez resueltas las ecuaciones, se dispone de los valores de las variables que definen el problema en cada uno de los elementos de la malla. Si además el problema es no estacionario, se obtiene un conjunto de datos por cada paso de tiempo. Además de estos datos numéricos es posible obtener otra información como: geometría del dominio, graficas vectoriales y de partículas, gráficas de superficies en 2D y 3D, trayectorias de partículas, animaciones de los resultados dinámicos, entre otros.

Ojeda Escoto Pedro, López Parra Marcelo, Farah Simón Alejandro, Ramírez Reivich Alejandro. Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológico. Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2009. Realizaron un artículo basado en CFD como una herramienta para diseño de productos. Los autores de este artículo explican los fundamentos de CFD. Explicando las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos que forman parte de estos fundamentos y que se consideran como formulaciones matemáticas de las leyes de la conservación de la Mecánica de Fluidos, además de eso también hacen énfasis en la simulación en CFD. la cual se basa en la generación del modelo 3D, mallado del dominio o discretización espacial sean de mallas estructuradas o mallas no estructuradas y por último sobre resolución de ecuaciones y análisis de resultados.

2.3 Glosario de Términos

Densidad

Es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Su unidad en el Sistema Internacional es

(kg/m^3), aunque frecuentemente también es expresada en g/cm^3 . La densidad es una magnitud intensiva.

Gravedad

La gravedad es un fenómeno natural por el cual los objetos con masa son atraídos entre sí, efecto mayormente observable en la interacción entre los planetas, galaxias y demás objetos del universo. Es una de las cuatro interacciones fundamentales que origina la aceleración que experimenta un cuerpo físico en las cercanías de un objeto astronómico. También se denomina interacción gravitatoria o gravitación.

Cavitación

La cavitación o aspiraciones en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando se crean cavidades de vapor dentro del agua o cualquier otro fluido en estado líquido en el que actúan fuerzas que responden a diferencias de presión, como puede suceder cuando el fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli.

Presión.

Fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie

Fluidización.

Es un proceso por el cual una corriente ascendente de fluido (líquido, gas o ambos) se utiliza para suspender partículas sólidas. Desde un punto de vista macroscópico, la fase sólida (o fase dispersa) se comporta como un fluido, de ahí el origen del término fluidización. Al conjunto de partículas fluidificadas se le denomina también lecho fluidificado.

CAD

El diseño asistido por computadoras, es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y diseñadores. Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo 2D y de modelado 3D. Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos.

Tubería

Es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos. Se suele elaborar con materiales muy diversos. También sirven para transportar materiales que, si bien no son propiamente un fluido, se adecuan a este sistema: hormigón, cemento, cereales, documentos encapsulados, etcétera.

Hidráulico

Es la rama de la física que estudia el comportamiento de los líquidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa y a las condiciones a las que esté sometido el fluido, relacionadas con la viscosidad de este.

Inercia

Es la propiedad que tienen los cuerpos de permanecer en su estado de reposo relativo o movimiento relativo. Dicho de forma general, es la resistencia que opone la materia a modificar su estado de movimiento, incluyendo cambios en la velocidad o en la dirección del movimiento. Como consecuencia, un cuerpo conserva su estado de reposo relativo o movimiento rectilíneo uniforme relativo si no hay una fuerza que, actuando sobre él, logre cambiar su estado de movimiento.

Variación de velocidad

Es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores.

Reogramas

Un reograma es una notación grafica para describir conjuntos de relaciones de ecuaciones lineales los reogramas se usan para dar solución a dichas ecuaciones y para construir directamente modelos de sistemas lineales.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Una vez formulado el problema, delimitado sus objetivos y alcance, establecidas sus bases teóricas, el marco metodológico de la investigación, define los aspectos relacionados al conjunto de métodos, procedimientos, instrumentos y técnicas utilizadas para el desarrollo y diseño de la investigación en función de los objetivos planteados.

Para Balestrini (2006) el marco metodológico, está referido al momento que alude al conjunto de procedimientos lógicos, tecno-operacionales implícitos en todo proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos; a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente en forma operacional

Para iniciar el marco metodológico se debe proceder a delimitar el camino a seguir para la obtención de los resultados, es por ello que primeramente se debe establecer ante qué tipo de investigación estamos presente, el tipo de investigación define el alcance de los objetivos; luego se debe establecer el nivel de la investigación, el cual se refiere al grado de profundidad y complejidad con el cual se desea abordar el estudio; para luego diseñar la investigación en el cual se describen los procedimientos o aspectos operativos de la misma, es decir cómo se desarrollará metodológicamente el estudio.

3.1 Tipo y Nivel de Investigación

Según Balestrini (2006) Es el grado de dificultad con que se aborda un objeto o fenómeno, puede ser de varios tipos y según los objetivos del estudio propuesto se puede clasificar de distintas maneras siendo estas: exploratoria, descriptiva y explicativa.

La presente investigación exploró el comportamiento del flujo incompresible a través del dos tipos de medidores de flujo, como los son la Placa Orificio y el Tubo Venturi, mediante el uso de herramientas donde se aplica la dinámica de fluidos computacional (CFD) , aunado a eso el manejo del software por medio del cual se estudió en los medidores de flujos, esto varia para cada aplicación, por lo que no se tiene una ruta ya establecida para la obtención de los resultados y requiere de análisis y estudio, debido a esto, se considera de nivel exploratoria.

Luego de observar los resultados se compararon con otros obtenidos experimentalmente en los catálogos seleccionados y se verificó que no violen el comportamiento normal de estos medidores.

Según Balestrini (2006) Un proyecto factible Consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos. El Proyecto debe tener apoyo en una investigación documental, de campo o un diseño que incluya ambas modalidades.

Así mismo los resultados obtenidos de forma cualitativa y cuantitativas revelan que el proyecto es un proyecto factible.

3.2 Diseño de la Investigación

De acuerdo con Hernández (2004), el diseño de investigación constituye el plan general del investigador para conseguir una respuesta clara a sus interrogantes o comprobar una hipótesis de investigación. El diseño de la investigación se encarga de detallar las estrategias básicas que el investigador adopta para conseguir información exacta y que se pueda interpretar.

El tipo de investigación es la manera que se va a adoptar para cumplir con los objetivos, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser Experimental, de Campo o Documental.

En base al objetivo general, se concibe que el nivel de la actual investigación será de tipo documental, ya que en este se busca obtener y analizar datos provenientes de materiales impresos u otro tipo de documentos para realizar la simulación y comparación de los fenómenos físicos y el campo de flujo presentes que integran el campo de flujo a través del dominio fluidizado de una Placa Orificio y un Tubo Venturi, en este caso con ayuda de una herramienta computacional CFD. Por lo tanto, el estudio se encuentra alineado en este nivel documental.

Según Zorrilla (1993), la investigación documental es aquella que se realiza a través de la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, memorias, anuarios, registros, códigos, constituciones, etc.).

3.3 Población y muestra

Para Hurtado (1998) la población o universo se refiere al conjunto para el cual serán válidas las conclusiones que se obtengan de los elementos o unidades, personas, instituciones o cosas que se van a estudiar (p. S/N).

Por ende, la población será: las diferentes curvas típicas generadas por los datos obtenidos de los catálogos seleccionados para cada medidor de flujos.

La muestra a emplear en este proyecto es una muestra del tipo no probabilística, donde Véliz, y Arredondo determinan en su trabajo de grado titulado Aspectos Teóricos sobre tipos de Muestreo, que este tipo de muestra es: “aquel tipo de muestra para el cual no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra (p. 30)”.

Por lo tanto, las muestras seleccionadas son: las diferentes curvas típicas generadas por los datos obtenidos de los catálogos seleccionados para cada medidor de flujos.

3.4 Técnica e Instrumentos de recolección de datos

Una vez delimitado el problema y definido el tipo, nivel y diseño de investigación realizado, se establecieron los métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

que fueron utilizados durante la ejecución de la investigación, en función de los objetivos planteados en el presente estudio; Ya que fueron estos los que permitieron el análisis del problema, para así emitir las conclusiones y recomendaciones para la solución del mismo.

Según Sabino (1992) un instrumento de recolección de datos es, en principio, cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información (p.114); para Grawitz (1975) estas técnicas son diversas según el objeto a que se apliquen y no se excluyen entre sí. Todavía es preciso, por una parte, saber elegir la más adecuada y, por otra utilizarla convenientemente (p. 6).

Se utilizo la técnica de revisión bibliográficas de trabajos de grado y otras publicaciones relacionadas con el estudio del campo de flujo incompresible que interactúa con la Placa Orificio, y Tubo Venturi, Todo esto con el fin de determinar los parámetros físicos involucrados en este proceso, así como también determinar los modelos matemáticos y leyes fundamentales que lo definen.

3.5 Fases Metodológicas

El proceso de investigación conlleva al establecimiento de etapas, fases, tareas e hitos que conduzcan al desarrollo sistemático de un conjunto de actividades orientadas al cumplimiento de los objetivos específicos planteados. La investigación se agrupa en tres fases:

Fase I: Identificar las variables, los parámetros y las normas que rigen el uso de medidores de flujos de tipo Placas Orificios y Tubo Venturi.

En esta fase, luego de una amplia investigación y documentación de estudios de Placas Orificios y Tubo Venturi, se seleccionará un modelo de cada uno, que serán los modelos a validar. Se van a determinar los parámetros y normas de dichos elementos de medición seleccionados para la aplicación de la investigación y los estudios, a fin de manejarlos como data necesaria para realizar los siguientes objetivos.

Fase II: Uso del software CAD como herramienta de dibujo asistido para Modelar digitalmente las geometrías más utilizadas de dichos medidores.

Mediante la utilización de una herramienta CAD, se realizará el diseño del dominio del fluido de la Placa Orificio y Tubo Venturi del cual el fabricante tenga registros de sus parámetros para luego modelarla en una herramienta de dibujo asistido por computadora (CAD), en el caso de la Placa Orificio su diseño se realizará con la herramienta ANSYS 18.1, a diferencia el Tubo Venturi con INVENTOR PROFESIONAL 2017.

Fase III: Discretizar el dominio y fijar las condiciones de borde del modelo aplicando las ecuaciones de gobierno para el campo de flujo.

Se debe aplicar el mallado apropiado para cada región del dominio, con el fin de obtener los resultados más aproximados a la realidad, con el modelo matemático se establecen las condiciones de entrada, salida y paredes del dominio mediante las cuales se resolverán las ecuaciones de gobierno.

Fase IV: Realizar la simulación del campo de flujo.

Considerando las condiciones de frontera y el mallado establecido previamente, se realizará la configuración del Solver de dinámica de fluidos computacional en base al modelo matemático que aplica al dominio fluidizado en estudio, lo cual nos arrojará los resultados pertinentes que luego serán tabulados y/o graficados teniendo como resultados los parámetros que describen el fenómeno.

Fase V: Obtener los resultados en forma de datos y por medio de representaciones gráficas de las variables y parámetros que describen el fenómeno.

Los resultados obtenidos después de la simulación proceden a ser comparados con los resultados arrojados teóricamente con parámetros definidos por los catálogos seleccionados, a fin de determinar las diferencias, validar nuestra investigación o de ser necesario, proponer nuevos hallazgos en forma de hipótesis.

Fase VI: Describir de los resultados basados en los principios físicos de la mecánica de fluidos.

Una vez obtenidos los resultados, se estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita, el movimiento de los fluidos y las fuerzas que lo provocan, ya que, los fluidos tiene una incapacidad para resistir esfuerzos cortantes y de esa forma validar estos fenómenos que ocurren en las Placas Orificios y Tubo Venturi seleccionados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el resultado de cada una de las fases metodológicas a fin de cumplir con los objetivos de analizar numéricamente el campo de flujo a través del dominio fluidizado de una Placa Orificio y un Tubo Venturi, donde sus dimensiones fueron seleccionadas por los autores del presente trabajo, cumpliendo así, el rango de trabajo para los que fueron diseñados según los fabricantes de dichos medidores,

4.1 Identificar las variables, los parámetros y las normas que rigen el uso de medidores de flujos de tipo Placas Orificios y Tubo Venturi

4.1.1 Placa Orificio

Gracias a su capacidad de poder trabajar con diferentes tipos de fluidos, la Placa Orificio concéntrica es la más popular en la industria, es por ello, que para este estudio se selecciona una Placa Orificio de este tipo, marca WEINSZ, fabricada conforme a ISA Rp. 3.2 API 14.3/ AGA Report 3, Catalogo N° 500, ISO 5167.

El catálogo seleccionado posee una gran variedad de diámetros con los que son capaces de fabricar. En este estudio se seleccionó una Placa Orificio de diámetro nominal de 2in, cumpliendo con la norma ISO-5167, ya que establece que $d_p = 12,5$ mm, dejando claro que cualquier diámetro nominal escogido que cumpla con la normativa, fuese servido como elemento de estudio para este trabajo.

Para completar el diseño de la Placa Orificio se seleccionó un tramo de tubería de Acero de calibre 40, por tener una buena resistencia mecánica, y su proceso corrosivo es más lento, siendo este material uno de los más comerciales en la industria, sus dimensiones cuentan con un largo de $(2 \times 2,5D_p)$ en aguas arriba y $(3 \times 8D_p)$ aguas

abajo, gracias a la norma ISO 5167-1, donde establece generalidades para los métodos de medida y los requisitos básicos.

El diámetro de la tubería fue seleccionado, cumpliendo con la norma del diámetro exterior de la placa orificio donde, cuenta con un rango de 50 mm D_P 1000 mm.

Teniendo así, las dimensiones del diseño de la Placa Orificio y la tubería:

- El diámetro de la tubería y diámetro exterior de la Placa Orificio

$$D_P = 77,9\text{mm}$$

- Largo de la entrada de la tubería:

$$L_{EP} = (2)(2,5)D = (2)(2,5)(77,9\text{mm}) = 389,5\text{mm}$$

- Largo de la salida de la tubería:

$$L_{SP} = (3)(8)D = (3)(8)(77,9\text{mm}) = 1869,6\text{mm}$$

Al seleccionar los diámetros del diseño se procede a calcular la relación de diámetro utilizando la Ec. 24 descrita en el capítulo II.

$$\beta_P = \frac{d_p}{D_P} = \frac{50,8\text{mm}}{77,9\text{mm}} = 0,6521$$

Siendo:

D_P = diámetro de la tubería

d_p = diámetro del orificio

Comprobando así que la relación de diámetros, cumple con la norma establecida, donde dice que, $0,1 < \beta_P < 0,75$

A pesar de que en el presente estudio ni la placa, ni la tubería van hacer sometidas a presión, es necesario comprobar la presión que ejerce el fluido sobre la Placa Orificio, ya que el fabricante establece que este medidor solo trabaja con un rango de presiones que dependen de la resistencias mecánicas del material escogido, comprando que las velocidades que se asumen sean correcta para este estudio, se necesita conocer el diámetro de la tubería, la presión máxima en la entrada y también es importante saber,

el material que está hecha la Placa Orificio, en este caso se seleccionó un material de Acero inoxidable 40, donde, tiene un S_y de 250Mpa. Ahora bien, utilizando la Ec.6 Del Cap II se tiene:

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

$$F = PA_T$$

Donde:

P= Presión en la entrada de la tubería

F = La fuerza ejercida en la Placa Orificio

A_T = Área transversal de la placa.

Como la superficie de la placa tiene un orificio y se necesita el área total transversal, entonces al área total transversal tomando en cuenta el diámetro tubería como largo y el espesor de la placa como ancho, se le debe ser restada el área transversal del orificio;

– Área transversal de la placa orificio

$$A_{TO} = 50,8(3,0302) = 167,741\text{mm}^2$$

– Área superficial de la Placa Orificio

$$A_{SP} = A_T - A_{TO} = ((77,9 \times 3,302) - 167,741)\text{mm}^2 = 89,485\text{mm}^2$$

– Fuerza Max sobre la Placa Orificio para que esta falle.

$$F_{max} = PA_T = 250\text{Mpa} (89,485\text{mm}^2) = 22371\text{N}$$

– Fuerza Max ejercida.

$$F = PA_T = 105,9\text{Mpa}(89,485\text{mm}^2) = 9476,35\text{N}$$

$$F_{max} > F. \text{ Funciona.}$$

Evidenciando, que la presión que se es ejercida sobre la Placa Orificio está dentro del rango de resistencia de sus propiedades mecánicas que posee dicho medidor.

La velocidad que tendrá el fluido durante el recorrido en este diseño, fueron asumidas. En la norma establece que el rango de velocidad recomendado para un estudio hidrodinámico es de un rango que va de 2,5 a 3 m/s; sin embargo, como lo que se desea es ver el comportamiento del fluido en diferentes velocidades, realizar el estudio con las velocidades antes mencionadas, los valores que arrojaba en el cálculo de número de Reynolds y Coeficiente de Descarga, estaban muy cercanos, no había casi variación, entonces, se procedió a salir del rango que también está permitido asumiendo unas velocidades de:

Velocidad de entrada de la tubería (Sección 1):

$$V_{1p} = [2,5; 4; 12; 18; 22; 104; 190] \text{m/s}$$

Para conocer la velocidad a la entrada de la placa orificio (sección 2) se utilizó la Ec. 10 del Cap. II.

$$V_{2p} = \frac{A_1 V_1}{A_2}$$

Siendo:

V_{1p} = Velocidad de la entrada en la tubería

V_{2p} = velocidad en la entrada de la Placa Orificio

A_T = Área de la tubería

A_{2p} = Área de la Placa Orificio

Se puede observar en la tabla 2, una tabla con los respectivos valores de las velocidades de las secciones 1 y 2 del diseño:

Tabla 2. Velocidades de la sección 1 y 2 de la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez y León. (2018)

V_{1P} (m/s)	V_{2P} (m/s)
2,5	5,88061174
4	9,40897879
12	28,2269364
18	42,3404045
22	51,7493833
104	244,633448
190	446,926492

El fluido con el que se realizó el estudio, es agua a una temperatura de 25°C, ya que se estima para cualquier estudio, de cualquier dispositivo hidrodinámico a nivel científico y universitario, asumen condiciones ambientales. En la tabla 3, se puede observar las propiedades físicas del agua a una temperatura de 25°C

Tabla 3. Propiedades físicas del agua

Fuente: Jiménez y León. (2018)

$T(^{\circ}C)$	
25	997,13
ν (m ² /s)	
$8,94 \times 10^{-7}$	$8,91 \times 10^{-4}$

A continuación, se calcula los Números de Reynolds en la tubería con la Ec. 36 del Cap. II.

$$Re = \frac{(V \times D)}{\nu}$$

Con las velocidades V_{1p} y diámetro de la tubería D_p .

A en la tabla 4, muestra las dimensiones de la placa orificio junto a las propiedades físicas del agua a una temperatura d 25°C, seguidamente se encuentra la tabla 5, quien tiene las velocidades de la entrada de la tubería y velocidad de la salida de la Placa Orificio.

Estos datos son necesarios para conocer los Números de Reynolds quien también forma parte de la tabla 5, mostrando el comportamiento del fluido.

Tabla 4. Dimensiones y parámetros para el cálculo de una Placa Orificio

Fuente: Jiménez y León. (2018)

A_T (m ²)	A_P (m ²)
$4,77 \times 10^{-3}$	$2,03 \times 10^{-3}$
	³⁾
0,652	997,13
^{2/s)}	
$8,94 \times 10^{-7}$	$8,91 \times 10^{-4}$
D_p (m)	d_p (m)
0,0779	0,0508

Tabla 5. Valores para el cálculo de una Placa Orificio

Fuente: Jiménez y León. (2018)

V_{1p} (m/s)	V_{2p} (m/s)	ρ (kg/s)	Re_p
2,5	5,88061174	11,8857896	$2,18 \times 10^5$
4	9,40897879	19,0172634	$3,49 \times 10^5$
12	28,2269364	57,0517901	$1,05 \times 10^6$
18	42,3404045	85,5776851	$1,57 \times 10^6$
22	51,7493833	104,594948	$1,92 \times 10^6$
104	244,633448	494,448847	$9,07 \times 10^6$
190	446,926492	903,32001	$1,66 \times 10^7$

En la tabla 5, también se puede notar los valores del flujo másico en las distintas velocidades y se calcularon a través de la ecuación 9:

Para el cálculo del coeficiente de descarga para Placa de Orificio, según la norma ISO-5167, mediante la ecuación 23, es necesario conocer los valores de la constante A, quien varia por los distintos Números de Reynolds, esto es conocido gracias a la ecuación 25:

Tabla 6. Valores arrojados en la constante A, en la variación de Números de Reynolds.

Fuente: Jiménez y León. (2018)

At
$1,01 \times 10^{-1}$
$6,93 \times 10^{-2}$
$2,88 \times 10^{-2}$
$2,08 \times 10^{-2}$
$1,77 \times 10^{-2}$
$5,11 \times 10^{-3}$
$3,16 \times 10^{-3}$

Mientras que la constante M_2 , se calcula con la ecuación 26, conociendo $L_1 = 1$ y $L_2 = 0,47$, se tiene que:

$$M_2 = \left(\frac{2}{1} \frac{L_2}{\beta} \right) = 2,701$$

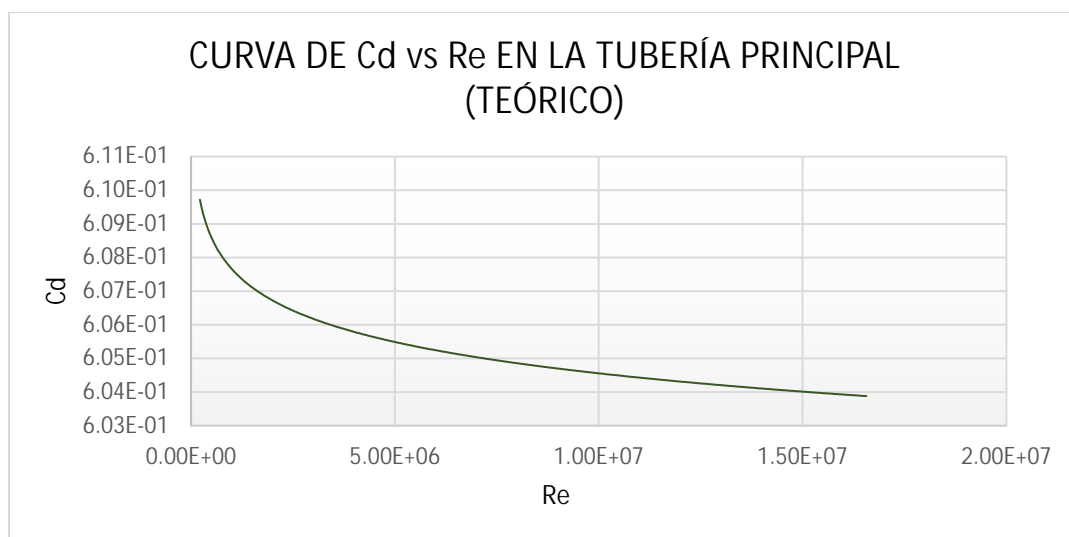
Sustituyendo todos los datos en la ecuación 23, los coeficientes de descarga teórico de la Placa Orificio en las distintas velocidades seleccionadas, son: (Ver Tabla 7)

Tabla 7. Cálculos teóricos de la Placa Orificio

Fuente: Jiménez y León. (2018)

Re_p	A	Cd_p	
$2,18 \times 10^5$	$1,01 \times 10^{-1}$	$6,10 \times 10^{-1}$	37904,5657
$3,49 \times 10^5$	$6,93 \times 10^{-2}$	$6,09 \times 10^{-1}$	97433,1138
$1,05 \times 10^6$	$2,88 \times 10^{-2}$	$6,07 \times 10^{-1}$	882990,932
$1,57 \times 10^6$	$2,08 \times 10^{-2}$	$6,07 \times 10^{-1}$	1990491,7
$1,92 \times 10^6$	$1,77 \times 10^{-2}$	$6,06 \times 10^{-1}$	2975937,93
$9,07 \times 10^6$	$5,11 \times 10^{-3}$	$6,05 \times 10^{-1}$	66823992,3
$1,66 \times 10^7$	$3,16 \times 10^{-3}$	$6,04 \times 10^{-1}$	223320912

Conociendo los valores de Reynolds y del Coeficiente de Descarga, quienes son generados por el rango de velocidades asumidas en la entrada de la tubería en el diseño de la Placa Orificio, se genera una curva, como la que se puede observar en la Grafica 1, la cual tiene un comportamiento conforme al comportamiento de la gráfica de la figura 10.



Gráfica 1. Curva típica de Cd vs Re con valores teóricos en la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, León. (2018)

Las tomas de presión se hacen antes (aguas arriba) para la toma de alta presión y después de la placa (aguas abajo) para la toma de baja presión. A través de éstas se puede medir la presión diferencial que permite obtener el flujo. Los lugares donde se realizan las tomas de presiones son muy importantes pues de estos depende en gran parte el coeficiente de descarga C_d . Esto debido principalmente a la distribución de presiones dentro de la tubería.

Las normas ISO para placa orificio son válidas dentro de las condiciones descrita anteriormente, aunque también, debe seguir los siguientes límites de uso:

- Para tomas en la brida $Re(D) \geq 5000$ y $Re(D) \leq 10^5$ $\frac{D}{d} \leq 2$) D. Con D en mm.
- Para las otras dos tomas $Re(D) \geq 10^4$ para $0,1 \leq \frac{D}{d} \leq 2$ y $Re(D) \leq 10^5$ $\frac{D}{d} \leq 2$) para $\alpha > 0,56$.

4.1.2 Diseño del Tubo Venturi.

Cualquier modelo de Tubo Venturi escogido fuese sido ideal para este estudio, sin embargo, se seleccionó un Tubo Venturi marca WIKA, modelo FLC-VT-WS; chapa de metal, ver (figura 25) con Rangos de:

- $D_{nominal}$: (200...1200) mm
-
- $Re = 2 \times 10^5 \dots 1 \times 10^8$
-
- $\alpha_1 = 21^\circ \pm 2^\circ$
- $5^\circ < \alpha_2 < 15^\circ$

Donde:

$\frac{D}{d}$ = Relación de diámetros

Re_T = Números de Reynolds

D_T = Diámetro Nominal (sección 1)

d_T = diámetro de la garganta (sección 2)

T = Temperatura

α_1 = Angulo de entrada

α_2 = Angulo de salida

V_{1T} = velocidad en la entrada (sección 1)

Asumiendo que;

El líquido a trabajar es Agua a una temperatura de 25°C ; $T_{@25^\circ\text{C}}$
= 0,4

D_T = 202,7 mm

α_1 = 21°

α_2 = 12°

V_{1T} = [2,5; 4; 12; 18; 22; 104; 150] m/s

Se tiene que:

Para el Tubo Venturi el fluido con el que se trabajó, fue agua a 25°C , donde en la tabla 3 fueron mostradas sus propiedades físicas.

Ya conocido la relación de diámetro y el diámetro de la sección 1 (D_T), se puede conocer el diámetro de la sección 2 (d_T), con la siguiente ecuación 24, del Cap II.

$$\beta = \frac{d_T}{D_T} \quad d_T = \beta D_T = (0,4)(202,7\text{mm}) = 81,08 \text{ mm}$$

Conociendo las dimensiones del medidor de fluidos, se procede a calcular por geometría, el largo de la entrada y de la salida del Tubo Venturi, teniendo así;

Largo de la entrada del Tubo Venturi

$L_t = 328,101\text{mm}$

Largo de la salida del Tubo Venturi

$L_d = 578,569\text{mm}$

A continuación, se calcula las velocidades en la garganta (sección 2) con la ecuación de la conservación de la masa. Ec. 10 descrita en el Cap II. Sabiendo que, el área de la entrada de la tubería (sección 1) es de $A_{1T} = 0,03226\text{m}^2$ y el área de la garganta (sección 2) es de $A_{2T} = 0,00516318\text{m}^2$ (Ver Tabla 8 y 9).

Tabla 8. Parámetros para el Tubo Venturi

Fuente: Jiménez, León. (2018)

A_{1T} (m ²)	A_{2T} (m ²)
$3,23 \times 10^{-2}$	$5,16 \times 10^{-3}$
(N/m ³)	(³)
9781,8453	997,13
(m ² /s)	(kg/ms)
8,94E-07	8,91E-04
D_T (m)	d_T (m)
0,2027	0,08108

Tabla 9. Velocidades en la sección 1 y 2 del Tubo Venturi

Fuente: Jiménez, León. (2018)

V_{1T} (m/s)	V_{2T} (m/s)
2,5	15,6202185
4	24,9923497
12	74,977049
18	112,465574
22	137,457923
104	649,801092
150	937,213113

Seguidamente se calcula el Números de Reynolds en la entrada del Tubo Venturi (sección 1) con la ecuación 36. (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Parámetros para calcular Números de Reynolds

Fuente: Jiménez, León. (2018)

V_{1T} (m/s)	Re
2,5	$5,67 \times 10^5$
4	$9,07 \times 10^5$
12	$2,72 \times 10^6$
18	$4,08 \times 10^6$
22	$4,99 \times 10^6$
104	$2,36 \times 10^7$
150	$3,40 \times 10^7$

Para el presente estudio es importante conocer el Flujo másico y el Caudal donde se calcula con las ecuaciones 9 y 12, descrita en el Cap. II.

Conociendo por la tabla 8, el área de la sección 1 y 2 del Tubo Venturi, se tiene como resultado, el flujo másico y el caudal de la sección 1 y 2, como se puede ver en la tabla 11:

Tabla 11. Flujo Másico y Caudal de la sección 1 y 2 del Tubo Venturi, variando sus velocidades.

Fuente: Jiménez, León. (2018)

V_{1T} (m/s)	V_{2T} (m/s)	(kg/s)	$Q1(m^3/s)$	$Q2(m^3/s)$
2,5	15,6202185	80,4185345	0,08165	0,08065
4	24,9923497	128,6696552	0,13064	0,12904
12	74,977049	386,0089656	0,39192	0,38712
18	112,465574	579,0134484	0,58788	0,58068
22	137,457923	707,6831036	0,71852	0,70972
104	649,801092	3345,411035	3,39664	3,35504
150	937,213113	4825,11207	4,899	4,839

Por último, se calcula el Coeficiente de Descarga de dicho medidor, a través de la ecuación 28. (Ver Tabla 10).

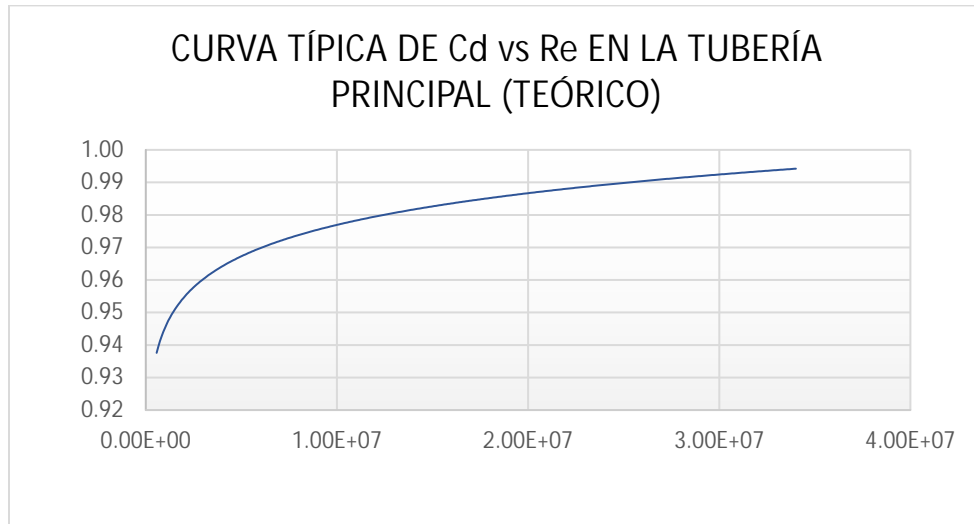
Obteniendo:

Tabla 12. Tabla de Número de Reynolds y Coeficiente de Descarga

Fuente: Jiménez, León (2018)

Re	Cd _T
5,67x10 ⁵	0,93
9,07 x10 ⁵	0,94
2,72 x10 ⁶	0,97
4,08 x10 ⁶	0,97
4,99 x10 ⁶	0,97
2,36 x10 ⁷	0,99
3,40 x10 ⁷	0,99

Al conocer los valores de los Números de Reynolds y del Coeficiente de Descarga (tabla 11) generadas por el rango de velocidades asumidas en la entrada de la tubería, se genera una curva, como la que se puede observar en la gráfica 2. La cual cumple con el comportamiento de la gráfica de la figura 11.



Gráfica 2. Curva típica de C_d vs Re con valores teóricos en el Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, León. (2018)

4.2 Uso del software CAD como herramienta de dibujo asistido para Modelar digitalmente las geometrías más utilizadas de dichos medidores.

El diseño de las instalaciones de los medidores de flujos que se utilizó en la simulación, se obtuvo con medidas normalizadas establecidas por los fabricantes de cada instrumento de medición, podemos destacar que las medidas de los tramos de tuberías recomendado para la instalación también están normalizadas bajo la Norma ISO 5167. Luego se recrearon los datos en el software de diseño dividiéndose en dos etapas.

4.2.1 Geometría diseñadas para la Placa Orificio y el Tubo Venturi.

A continuación, se presentan los modelos CAD establecidos para cada medidor de flujo de forma detallada según lo antes mencionado.

Este medidor donde se dio a conocer sus dimensiones y parámetros en la fase anterior, fue modelado mediante la herramienta CAD, ANSYS WORKBENCH 18.1, donde en la figura 23, se puede notar el diseño de instalación de la Placa Orificio seleccionada.

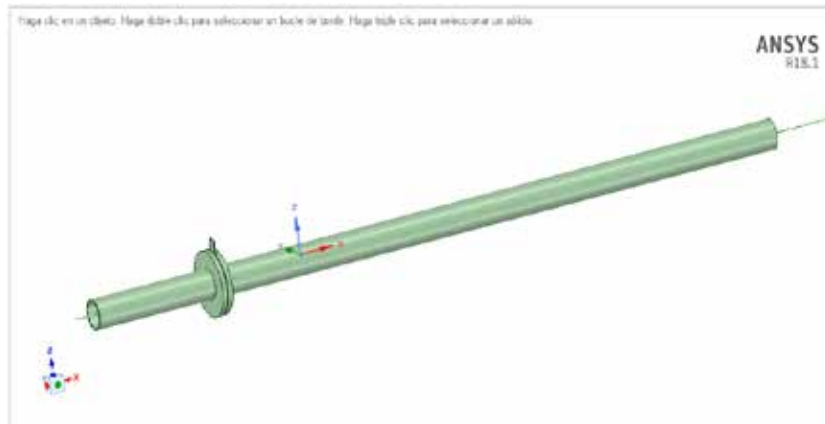


Figura 23. Geometría Diseñada para la instalación de la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

El modelado de este medidor de fluidos, se realizó en tres partes, iniciando con la Placa Orificio concentrica, seguidamente la sección de la tubería de aguas arriba y, para terminar el diseño de las piezas de instalación, se realizó el modelado de la sección de tubería aguas abajo, realizando un ensamblado de las piezas mencionadas, obteniendo como resultado el diseño final ya visto anteriormente en la figura 23.

Ya modeladas las geometrías del diseño para la Placa Orificio, se obtuvo a partir de ellas el volumen interno de cada uno, donde, viene a ser el espacio ocupado al momento de desplazamiento del fluido de manera estacionaria, menos el lugar ocupado por el cuerpo de estudio. (Figura 24).

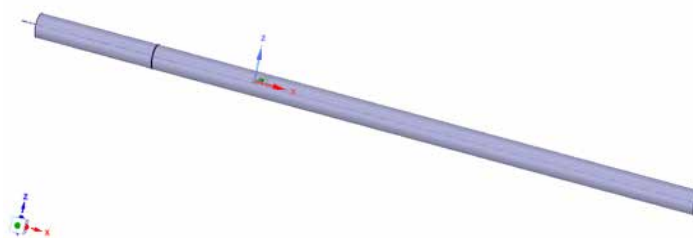


Figura 24. Dominio del Fluido para el diseño de la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

Al igual que la placa orificio, se conoce las dimensiones y parámetros del medidor de fluidos, tipo Tubo Venturi, aunque a diferencia de la Placa Orificio, el Tubo Venturi fue modelado utilizando la herramienta CAD, INVENTOR PROFESIONAL 2017. Figura 25.

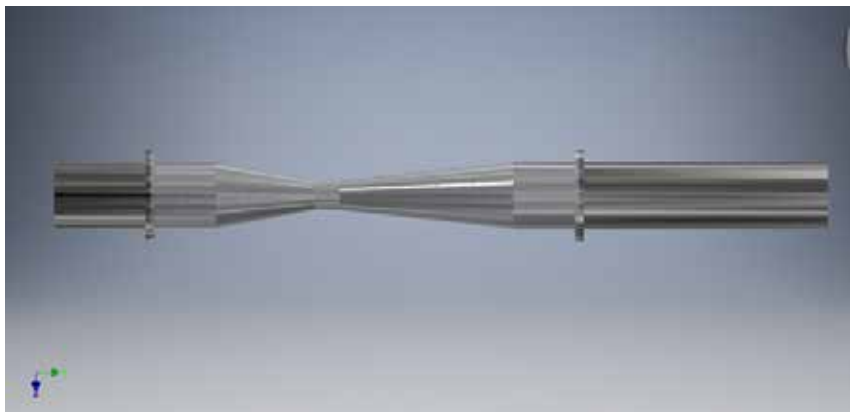


Figura 25. Geometría Diseñada para la instalación del Tubo Venturi.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

Este diseño consta de tres partes, iniciando con el Tubo Venturi normalizado, cumpliendo las especificaciones de las normas establecidas, luego sigue el tramo de tubería aguas arriba y para finalizar, el tramo de tubería aguas abajo, donde seguidamente son unidas estas 3 piezas mencionadas.

Para el diseño del Tubo Venturi se procedió a exportar el archivo en formato (*.SAT) desde la herramienta de diseño Inventor Profesional 2017, para poder extraer el Dominio del Fluido con la herramienta de Space Claim, (ver figura 26) en cuanto al diseño de la Placa Orificio este paso no fue necesario para obtener el Dominio del Fluido, debido a que fue diseñada en dicha herramienta de trabajo.

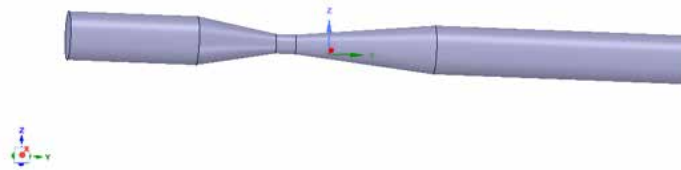


Figura 26. Dominio del Fluido para el diseño del Tubo Venturi.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

4.3 Discretizar el dominio y fijar las condiciones de borde del modelo aplicando las ecuaciones de gobierno para el campo de flujo.

Se realizó la discretización de ambos dominios, analizando la calidad de las mallas establecidas por defecto, hasta llegar a obtener un mallado apropiado para ambos dominios de forma independiente, luego se establecieron las condiciones de bordes necesaria para el funcionamiento apropiado de los medidores de flujo. En los siguientes puntos trataremos con mayores detalles cada uno de estos pasos realizados.

4.3.1 Discretización de los diseños a estudiar.

En esta fase se procedió a establecer los nombres en cada región del dominio para cada diseño, con programa (Mesh) perteneciente al paquete computacional ANSYS WORKBENCH 18.1, estableciendo para cada uno iguales denotación para las Entradas, Cuerpo y Salida de la siguiente manera: (Inlet)-Entrada, (Wall)-Cuerpo y (Outlet)-Salida. Ver figura 37 para el diseño de la Placa Orificio y ver figura 38. Para el diseño del Tubo Venturi.

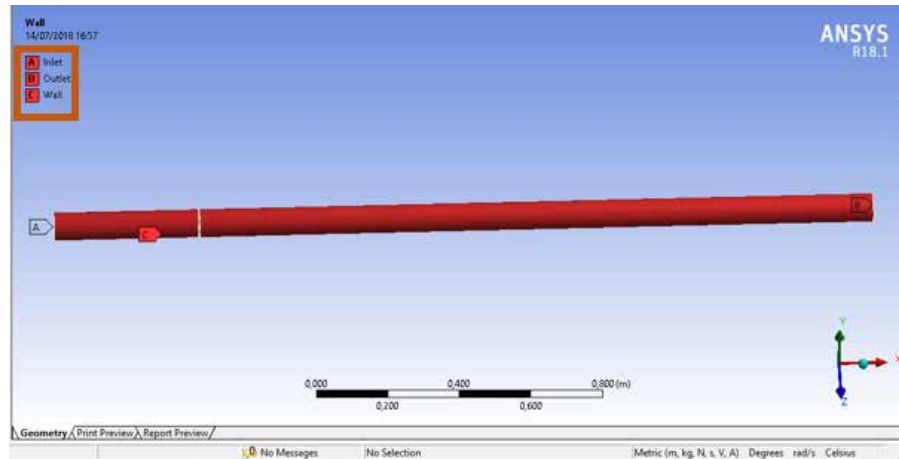


Figura 27. Nombres de las regiones para diseño de Placa Orificio.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

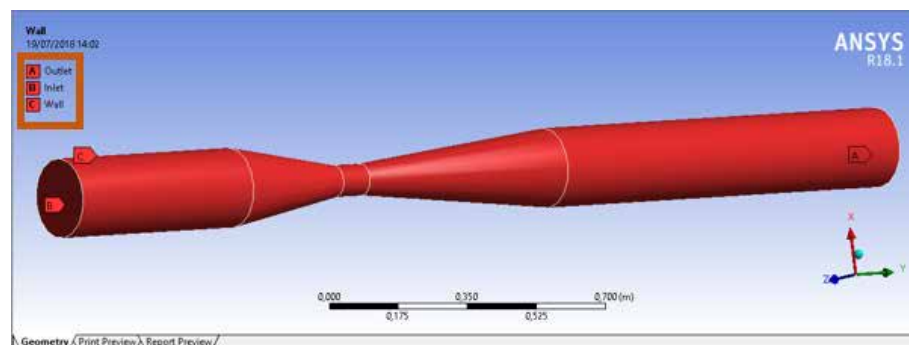


Figura 28. Nombres de las regiones para el diseño del Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, Leon (2018)

4.3.2 Mallado del Dominio del Fluido.

Una vez establecidas las regiones de los diseños a estudiar, se realizó el mallado con la herramienta CFD, la cual es capaz de realizar la discretización espacial del dominio (mallado). Primeramente, se realiza la configuración de la preferencia física, la cual puede ser: mecánica, electromagnética o en nuestro caso CFD.

Posteriormente, se le indica cual es el programa de análisis numérico que realizará la solución de las ecuaciones de gobierno en la discretización espacial del dominio (CFX donde fue, el caso a realizar). La herramienta de discretización espacial posee varios algoritmos de mallado, los cuales utilizan elementos tetraédricos, hexaédricos, prismas de base triangular, pirámides de base cuadrada, entre otros.

Se seleccionó un método de mallado tetraédrico como polígono dominante en los diseños. Debido a que generan un menor número de elementos y nodos, lo cual ayuda al ahorro de recurso computacional por la menor cantidad de ecuaciones que el programa de análisis numérico debe resolver, igualmente estos elementos describen la geometría con polígonos organizados con la mejor calidad en estadísticas en comparación con las otras configuraciones de mallado.

Para el mallado del dominio de la Placa Orificio, se obtuvo un total de 9749 Nodos y 43937 elementos Tetraédricos, con una configuración estándar como se aprecia en la figura 29.

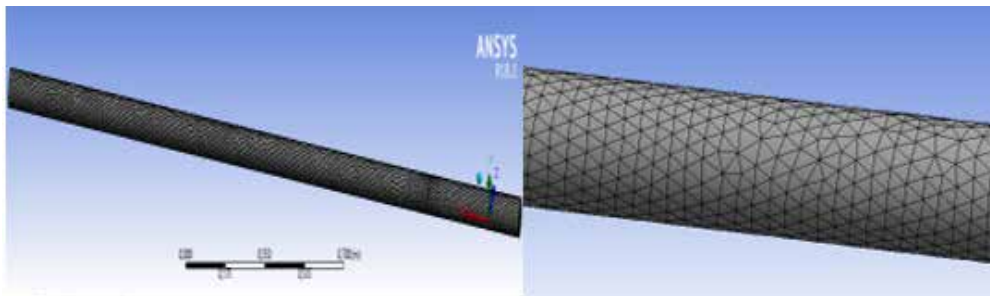


Figura 29. Mallado tetraédrico en el dominio del diseño para la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

Para el mallado del dominio del Tubo Venturi, se obtuvo un total de 10737 Nodos y 40709 Elementos Tetraédricos con una configuración Refinada en el mallado de todo el dominio como se ve en la figura 30.

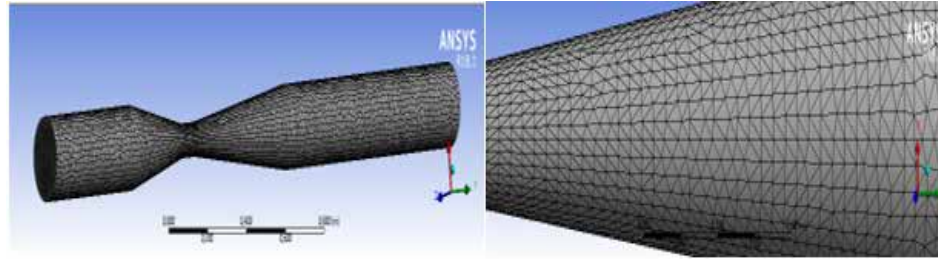


Figura 30. Mallado tetraédrico refinado en el dominio del diseño del Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, Leon (2018)

4.3.3 Condiciones de contorno de los modelo físico y campos de flujo a estudiar.

Se realiza la Importación del Mesh al programa CFX para establecer las condiciones de bordes de cada dominio, teniendo en cuenta que para ambos estudios se toma como configuración inicial los fluidos que circulan a través de ellos en el Default Domain, los cuales son: Agua a 25 °C, estos materiales están presentes en la biblioteca interna del programa.

Luego, se selecciona la presión de referencia, la cual será 1 atm, ya que esta presión es referida a nivel industrial, para fines de investigación científicos y universitarios, según el Ingeniero Freddy López (2016), esto significa que las presiones que se asignen como condiciones de borde, serán consideradas como presiones manométricas, es decir, relativas a una atmosfera. El movimiento del dominio es seleccionado en este caso, estacionario. También, se considera el Dominio Isotérmico y, por último, se escoge un método de solución para la turbulencia de K-Épsilon.

4.3.4 Establecimiento de las condiciones de borde.

Se asigna sobre las superficies de todo el dominio, las propiedades físicas y características conocidas, a partir del cual las ecuaciones de gobierno se resolverán. Se asignan tres condiciones de borde, la primera es la entrada del flujo de ambos medidores, llamada “Inlet”, la segunda es la condición de borde son las paredes llamadas “Wall” ubicada en toda la superficie del dominio de ambos diseños, la tercera condición llamada “Outlet” ubicada a la salida de los diseños y la última condición de borde es de pared llamada “Dominio Default Dominio” ubicada en todas las superficies sin asignar una condición

Se configura la condición de borde “Inlet” como condición de borde de tipo: entrada; la ubicación de la misma es en la entrada de la tubería del diseño, es asignada automáticamente por el programa de análisis numérico, debido a que previamente en el proceso de mallado se le asignó a esta superficie el nombre de “Inlet”, (ver figura 31.)

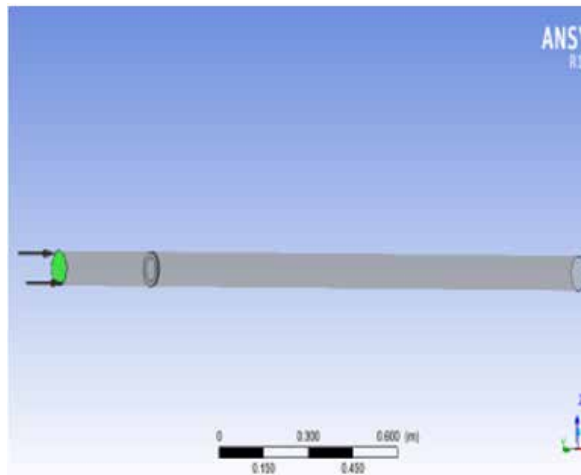


Figura 31. Configuración básica de la condición de borde “Inlet”, flechas de flujo sobre la superficie de entrada del diseño. Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

El régimen de flujo se establece como subsónico, debido a la posibilidad de choque si se establece otro régimen. Como dato conocido para la realización del presente estudio, se obtuvieron una serie de calculos para conocer una series de Flujos Masicos, dentro de las velocidades recomendadas por el fabricante de la Placa Orificio, para poder establecerlos como parametros de entrada, los datos obtenidos se encuentran tabulados en la siguiente tabla. (ver tabla 13). Que se utilizara para cada simulacion. La turbulencia se establece médium (intensity = 5%), debido a que no se conoce información sobre la turbulencia en la entrada.

Figura 13. Flujos Masicos de entrada. Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

S	V _{IP} (m/s)	(kg/s)
1	2,5	11,8857896
3	4	19,0172634
3	12	57,0517901
4	18	85,5776851
5	22	104,594948
6	104	494,448847
7	190	903,32001

La condición de borde de pared “Wall” ubicada en todas las superficies del dominio del diseño del medidor, se configuran automáticamente por el programa de análisis numérico como adiabáticas, es decir a través de ellas no existe transferencia de calor, y esto concuerda a la configuración de los dominios como isotérmicos, realizado previamente. En la figura, se presenta la configuración realizada. Se agredo la rugosidad de las tuberías de Acero comercial mencionado previamente, (ver figura 32).

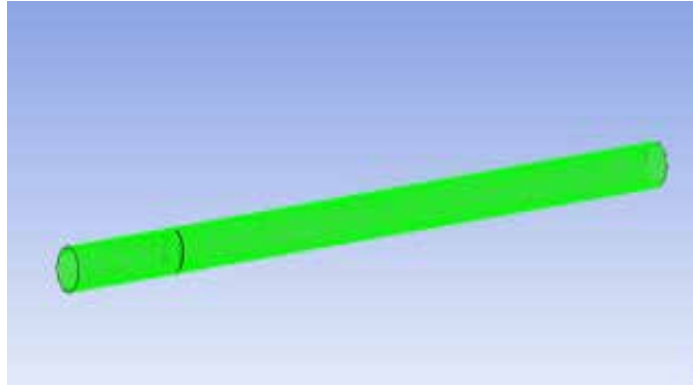


Figura 32. Configuración de borde de las paredes “Wall”. Placa Orificio.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

La condición de borde de salida “Outlet” se configura de igual forma como subsónico, de tipo estacionario, y la presión estática como (0 Pa). (Ver figura 33).

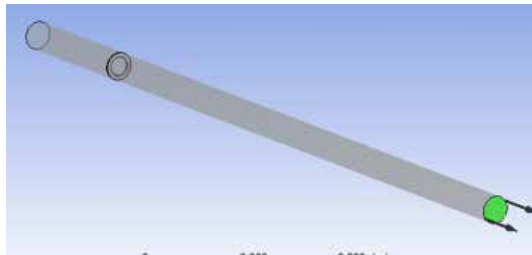


Figura 33. Configuración de borde de la Salida “Outlet”. Placa Orificio.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

Se configura la condición de borde “Inlet” en el dominio de igual forma que en la Placa Orificio, ésta es asignada automáticamente por el programa de análisis numérico, debido a que previamente en el proceso de mallado se le asignó a esta superficie el nombre de “Inlet” para la entrada del fluido (Ver Figura 34.)

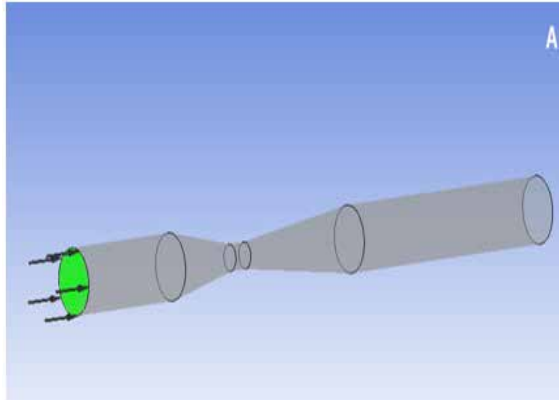


Figura 34. Configuración básica de la condición de borde “Inlet”. Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

De igual forma que en dominio de la Placa Orificio antes mencionado, como parametro de entrada al medidor se establecieron distintos Flujo Masico, calculados debidamente en base a las velocidades establecidas para el Tubos Venturi. (Ver Tabla 14.)

Tabla 14. Flujos máxicos de entrada. Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

S	V_{IT} (m/s)	(kg/s)
1	2,5	80,4185345
2	4	128,6696552
3	12	386,0089656
4	18	579,0134484
5	22	707,6831036
6	104	3345,411035
7	150	4825,11207

La condición de borde de pared “Wall” en el dominio del Tubo Venturi, tambien se consideran adiabáticas, es decir a través de ellas no existe transferencia de calor. Se agregó de igual forma la rugosidad de las tuberias de Acero comercial mencionado previamente en la Figura 35.

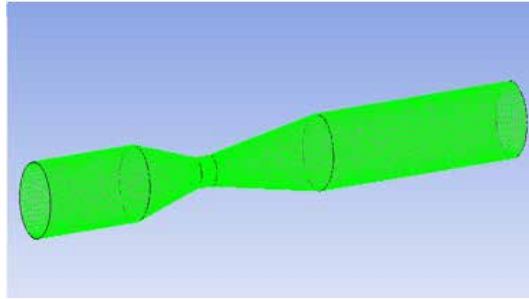


Figura 35. Configuración de borde de las paredes “Wall”. Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

La condición de borde de salida “Outlet” se configura de igual forma en el Tubo Venturi como subsónico, de tipo estacionario, y la presión estática como (0 Pa).(Ver Figura 36.)

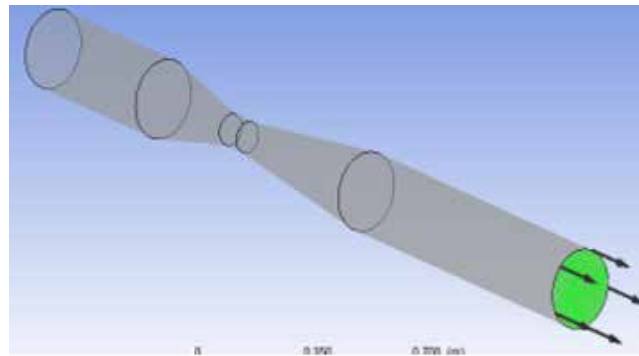


Figura 36. Configuración de borde de la Salida “Outlet”. Tubo Venturi.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

4.3.5 Criterios de convergencia.

Los criterios de convergencia, que fueron explicados en la sección del Cap II, son los parámetros que se establecen como indicativos de que los resultados obtenidos son confiables y adaptados a la realidad física de funcionamiento de la turbomáquina. Existen cuatro criterios de convergencia de los cuales en el presente estudio son tomados tres de ellos:

Los Criterio de convergencia a establecer es el número de iteraciones que el “Solver” realizará para encontrar la solución numérica de las ecuaciones de gobierno (continuidad y momento), el modelo de turbulencia y el de cavitación. Mediante el

análisis de trabajos antecedentes y gracias a The Best Practices (Las Mejores Prácticas) de ayuda de ANSYS, y por medio de simulaciones realizadas, estable el parámetro a 300 iteraciones.

También, el Criterio de convergencia, valor de los residuos “Raíz Cuadrada Media”, RMS por sus siglas en inglés “Root Mean Squar”. Debido a que el estudio requiere de una precisión en cuanto a las líneas de flujo y contornos de presión, el valor establecido será 10^{-5} , por ser un valor que sirve para un análisis a nivel ingenieril, arrojando buenos resultados en el análisis numérico.

4.4 Realizar la simulación del campo de flujo.

Una vez realizado la discretización de los diseños, de haber configuración de las condiciones de borde y los criterios de convergencia en el programa ANSYS CFX se procedió a dar inicio a la simulación de los diferentes dominios con las diferentes condiciones de trabajo para obtener resultados y continuar con el desarrollo de la investigación.

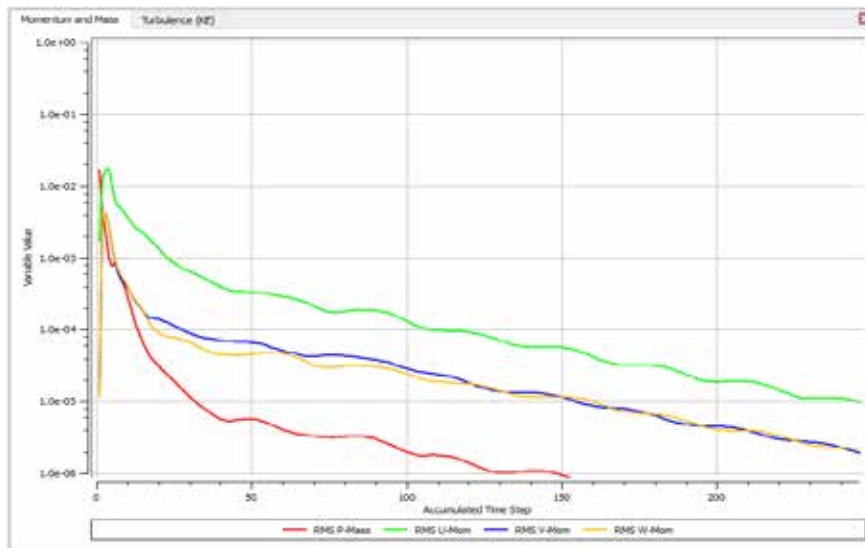
4.4.1 Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia.

En esta fase presentaremos de manera gráfica y explicativa las convergencias de las ecuaciones de gobierno, turbulencia, así como también los contornos obtenidos de las simulaciones realizadas para cada medidor de flujo analizado. Cabe destacar que se realizaron 7 simulaciones para cada medidor con parámetros distintos como se mencionó en la fase anterior.

Se presentan a continuación los gráficos RMS, simulados para los distintos flujos máximos calculados previamente. Es importante recordar, que el criterio de convergencia RMS es establecido a 10^{-5} , además de que el máximo de iteraciones es

de 300; es decir que una vez que el “Solver” alcance uno de los criterios de convergencia, la simulación culmina.

En la gráfica 3. se observa el valor de RMS de las ecuaciones de masa (P-Mass) y momentum (U-Mom, V-Mom y W-Mom), alcanzan la convergencia a 246 iteraciones al llegar al error RMS de 10^{-5} con un tiempo computacional de 4 minutos y 20 segundo. Los primeros valores RMS en converger son los valores de la gráfica “P-Mass” masa P (línea roja) con 150 iteraciones aproximadamente, seguido de “V-Mom” momentum V (línea azul) con 155 iteraciones, luego “W-Mom” momento P (línea amarilla) con 160 iteraciones y por ultimo “U-Mom” momentum U (línea verde) con 246 iteraciones finalizando la simulación, representando cada una un comportamiento único del fluido en todo el dominio para los parámetros de entrada seleccionados.

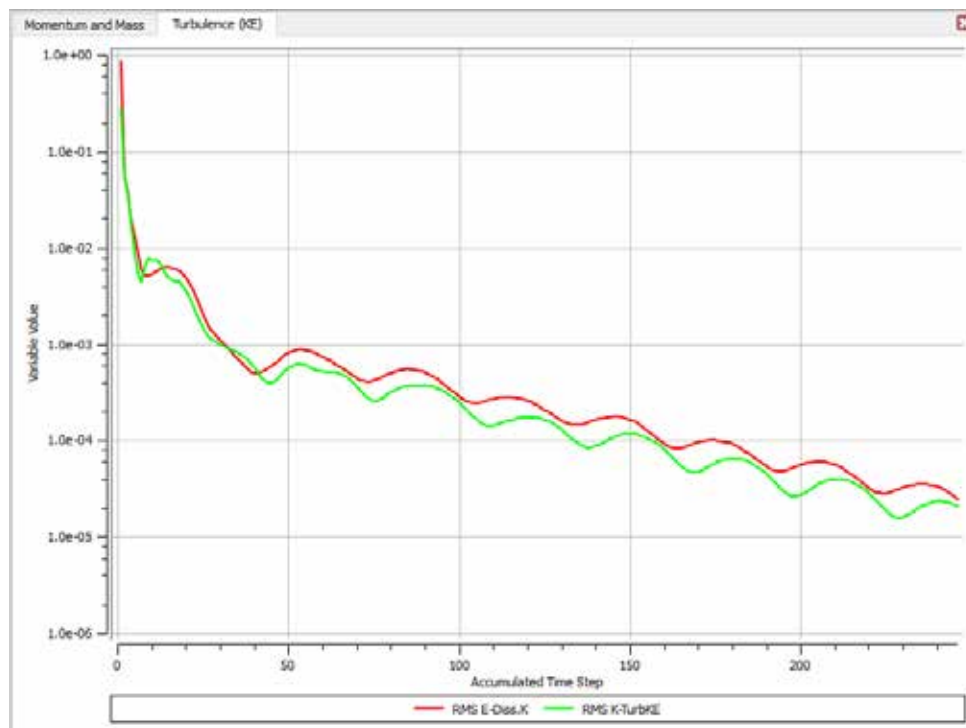


Gráfica 3. Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 11,8857896$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

En la gráfica 4. se puede ver la convergencia de las ecuaciones de turbulencia al valor de RMS entre 10^{-3} y 10^{-5} , la gráfica de la turbulencia de cinética (línea verde) forma ondas en su trayectoria y converge en un numero de iteraciones de 246 y se encuentra por debajo de la gráfica de turbulencia de disipación (línea roja) que tiene un

comportamiento similar y converge a las 246 iteraciones, siendo su descenso no es tan pronunciado al transcurrir el tiempo. El tiempo computacional fue de 4 minutos y 20 segundo para esta simulación.



Gráfica 4. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K-
borde igual a $m = 11,8857896$ Kg/s y $P_s = 0$ Pa.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

A continuación se muestra una tabla comparativa (ver tabla 14), donde podrá observar el número de iteraciones y tiempo ocupacional de cada simulación con los distintos flujos másicos. A pesar de que cada simulación se logró hacer por separado las gráficas de convergencia de masa, momentum y turbulencia, fueron todas similares, lo que se puede observar en el apéndice del presente trabajo de investigación.

Tabla 15. Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para el dominio de la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, León (2018)

FLUJO MÁSSICO (kg/s)	NÚMERO DE ITERACIONES	TIEMPO COMPUTACIONAL
19,0172634	246	3min y 58seg
57,0517901	245	4min y 31seg
85,5776851	245	4min y 45seg
104,594948	245	4min y 31seg
494,448847	245	5min y 8 seg
903,32001	245	4min y 46seg

Campos de Presión, Velocidad y Turbulencia, para las simulaciones en las cuales se trabajó con flujos mássicos iguales a $\dot{m} = [11,8857896; 19,01726336; 57,05179008; 85,57768512; 104,5949485]$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

En las figuras de la 37 a la 41, se muestran las presiones, velocidades y turbulencias en el interior del dominio diseñado para la Placa Orificio con el fin de analizar el comportamiento del fluido en las diferentes zonas del dominio.

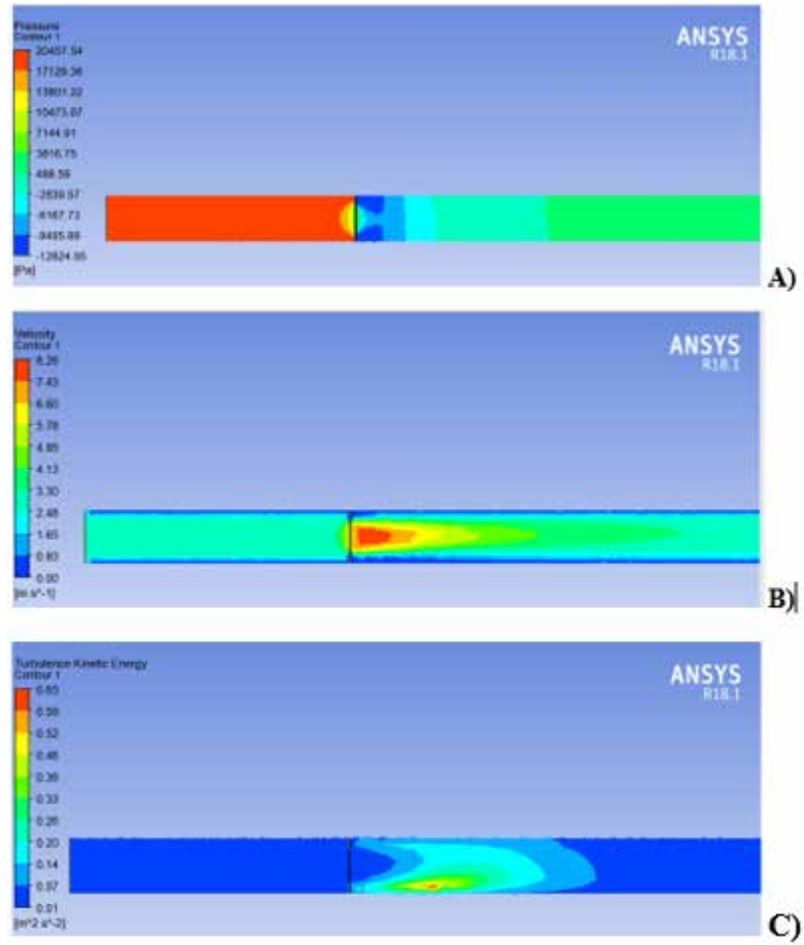


Figura 37. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 11,8857896 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

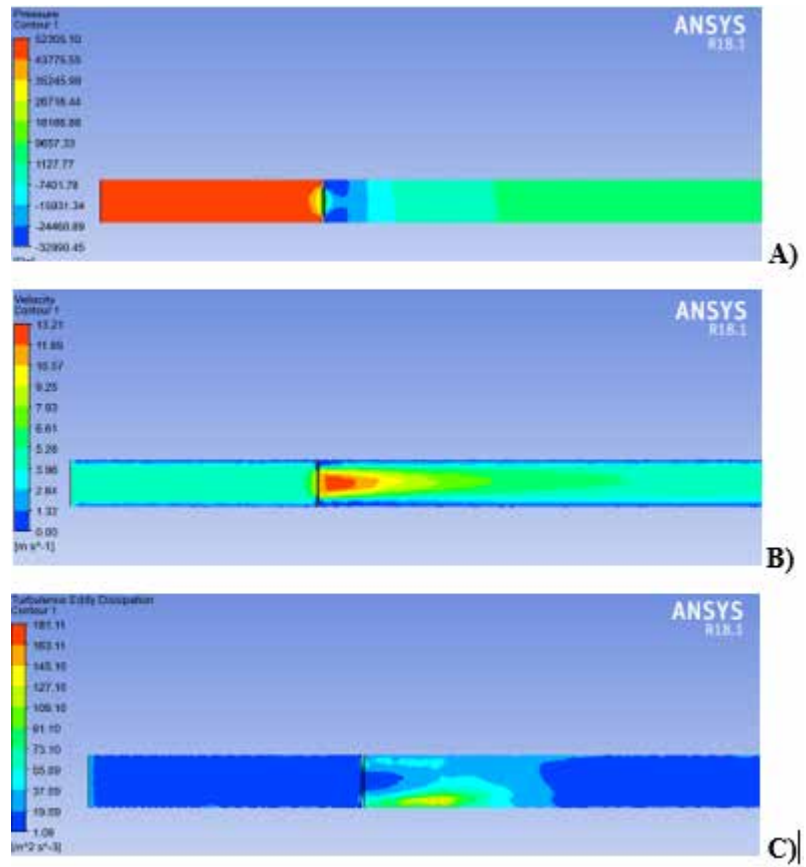


Figura 38. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 19,01726336 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

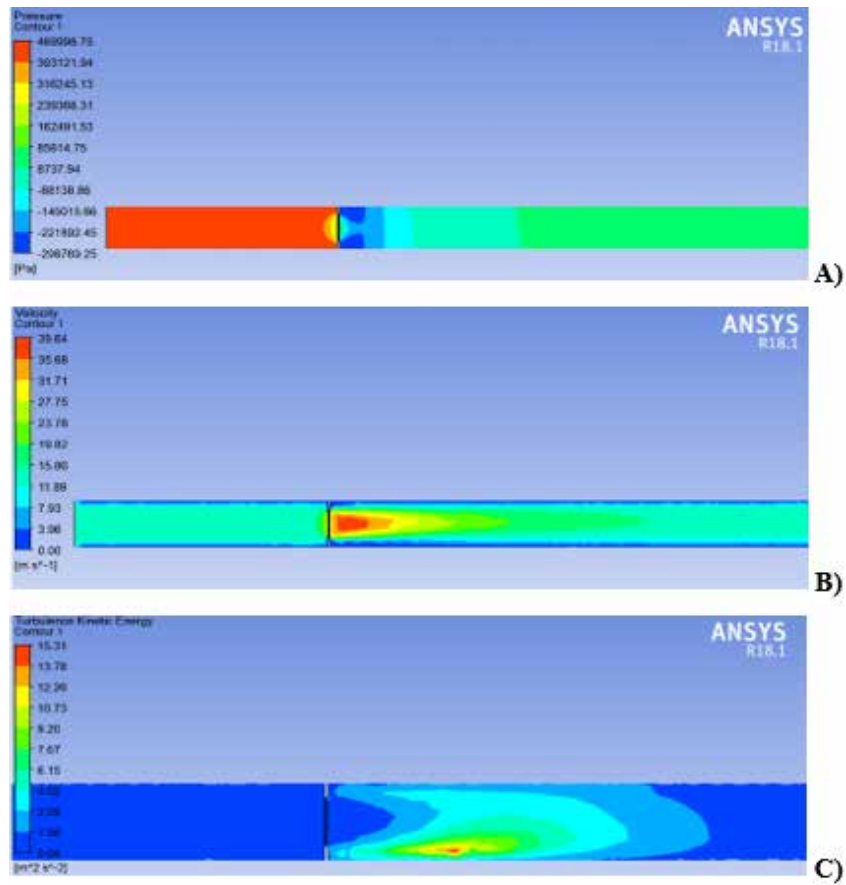


Figura 39. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 57,05179008$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

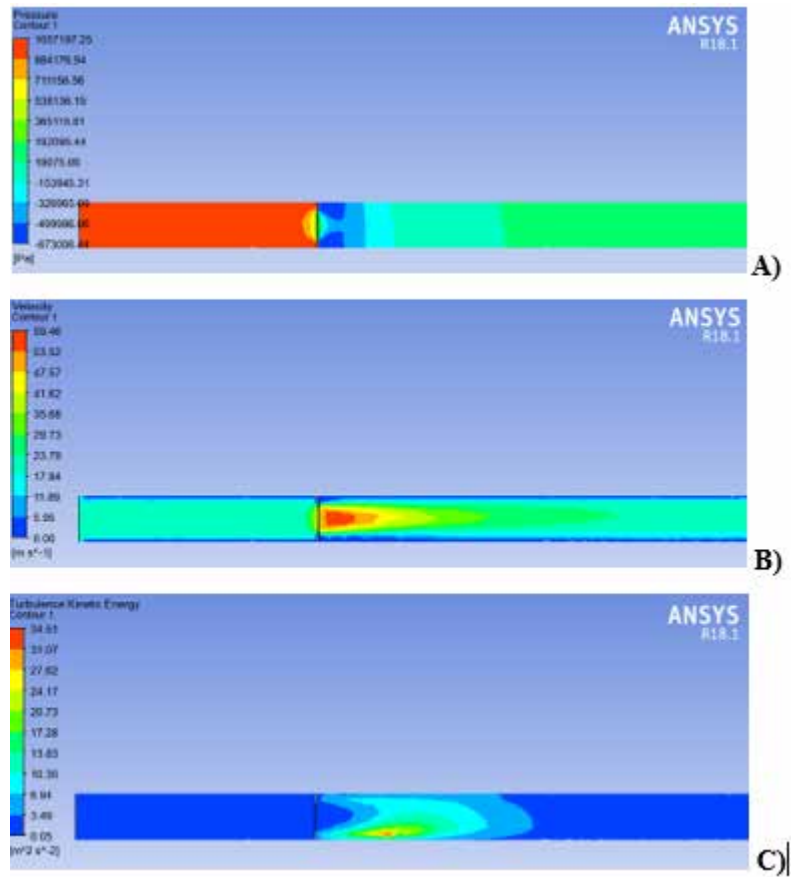


Figura 40. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 85,57768512 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

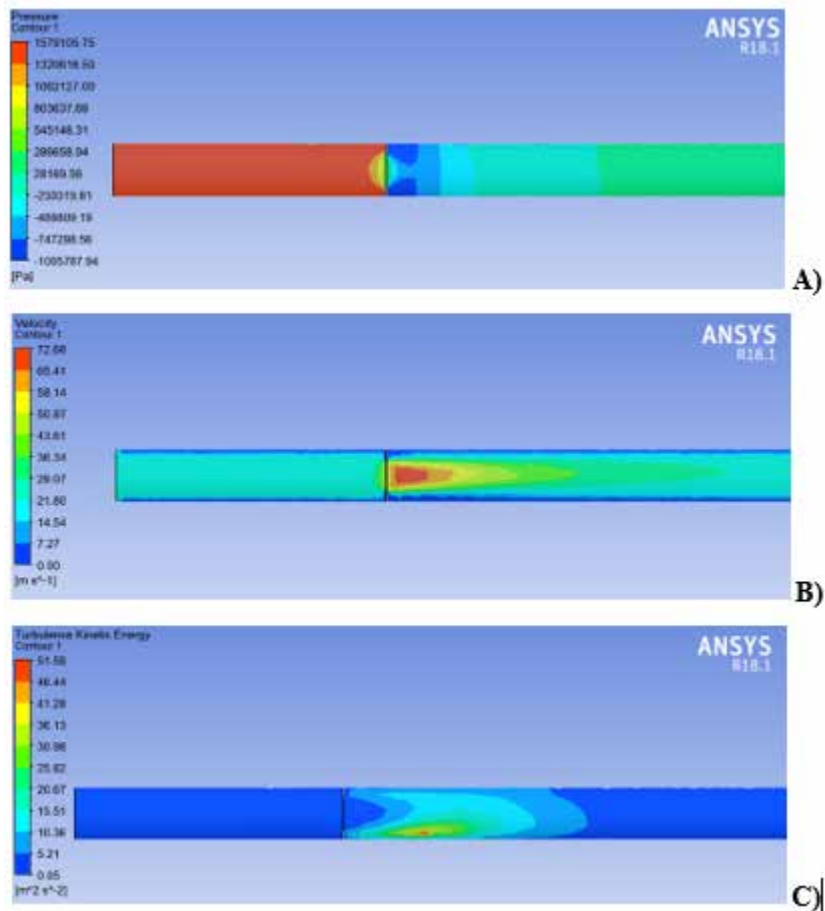


Figura 41. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 104,5949485$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

En el intervalo de figuras antes mostradas, se muestran los distintos campos de presión, velocidad y turbulencia en el interior del medidor de flujo para los diferentes flujos máxicos = [11,8857896; 19,01726336; 57,05179008; 85,57768512; 104,5949485] Kg/s y $P_s=0$ Pa, los cuales realizando un estudio cualitativo nos permite apreciar los diferentes cambios de presión ocurridos a medida que el fluido va atravesando la Placa Orificio y va aumentando la velocidad. Podemos decir que se observar que los resultados concuerdan a lo establecido en las teorías de conservación de la energía y continuidad, porque se logra apreciar un lado de alta presión antes de la placa (zona roja) y un lado de baja presión después de pasar por la Placa Orificio (zona

azul eléctrico) hasta llegar a equilibrarse nuevamente en el tramo de tubería, igualmente el aumento de velocidad al pasar el fluido por el orificio debido a la reducción de diámetro, llegando a alcanzar la velocidad máxima en este punto (zona roja) generando turbulencia cinética a la salida de la misma por su gran velocidad como se puede apreciar en las figuras de turbulencia para cada simulación.

4.4.1.3 Comportamiento de Líneas de Flujo y Vectores en la Placa Orificio.

Para el análisis de las líneas de flujo y los vectores de velocidad podemos decir que la variación de cada uno con respecto a las distintas simulaciones es insignificante, sin embargo, realizaremos la comparación de la primera simulación y la última para este diseño con las figuras 42 y 43.

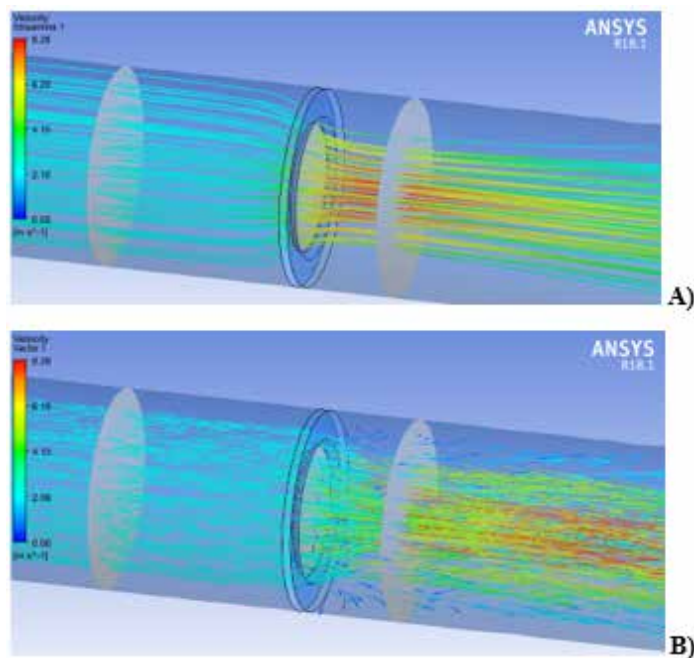


Figura 42. Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 11,8857896 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018)

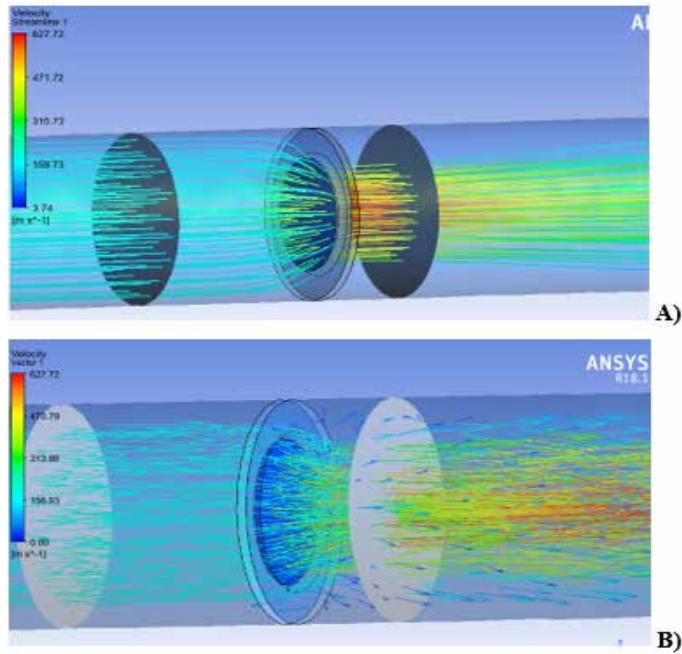


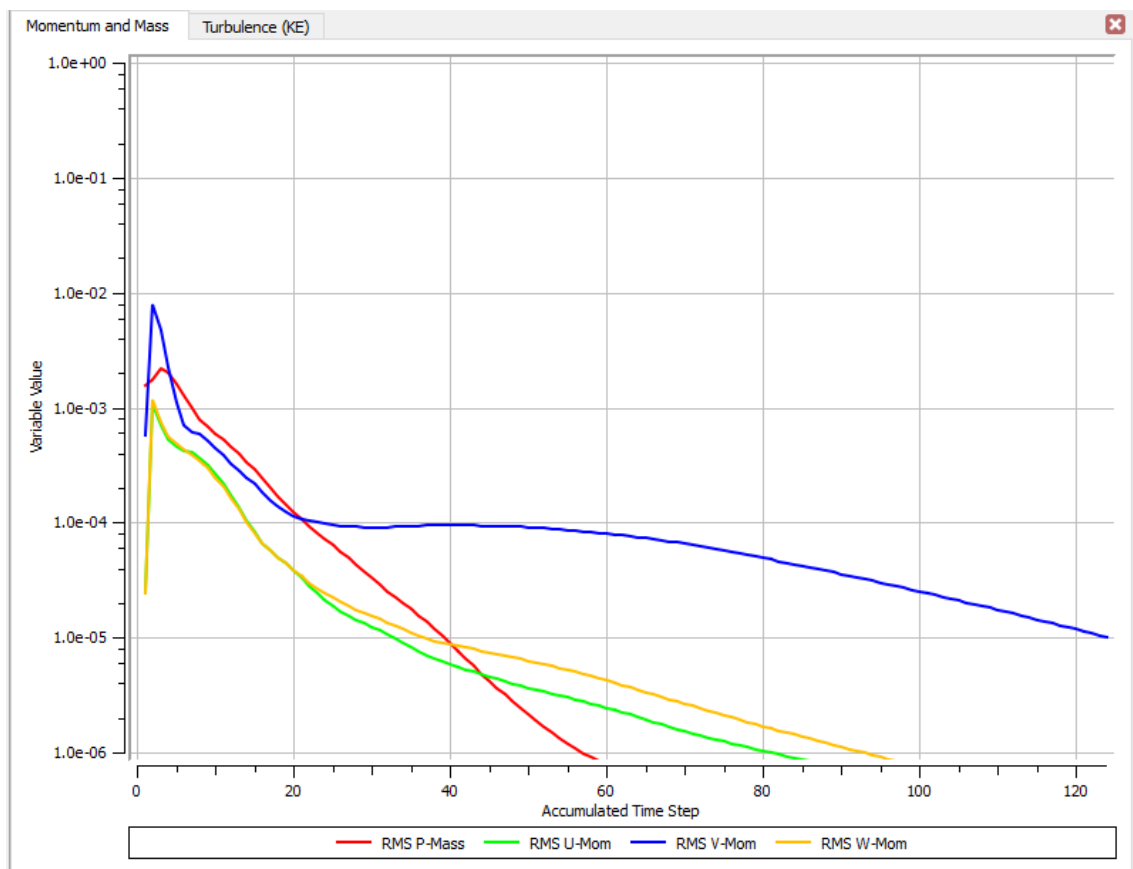
Figura 43. Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 903,3200096 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

En la figura 42 y 43, se puede observar en esta zona del dominio un comportamiento similar en la escala de colores de los vectores de velocidad y las líneas de flujo de ambas simulaciones, con variaciones muy pequeñas casi imperceptibles, es decir, a pesar de que las magnitudes de las velocidades son distintas para cada simulación, el comportamiento es similar en esta zona del dominio, representando la zona roja la mayor velocidad alcanzada del fluido mientras la azul eléctrica la mínima.

Se presentan los gráficos RMS simulados para los distintos flujos máxicos calculados para el Tubo Venturi. Teniendo un criterio de convergencia RMS establecido igualmente de 10^{-5} , con un máximo de iteraciones de 300; es decir que una vez que el “Solver” alcance uno de los criterios de convergencia, la simulación culmina.

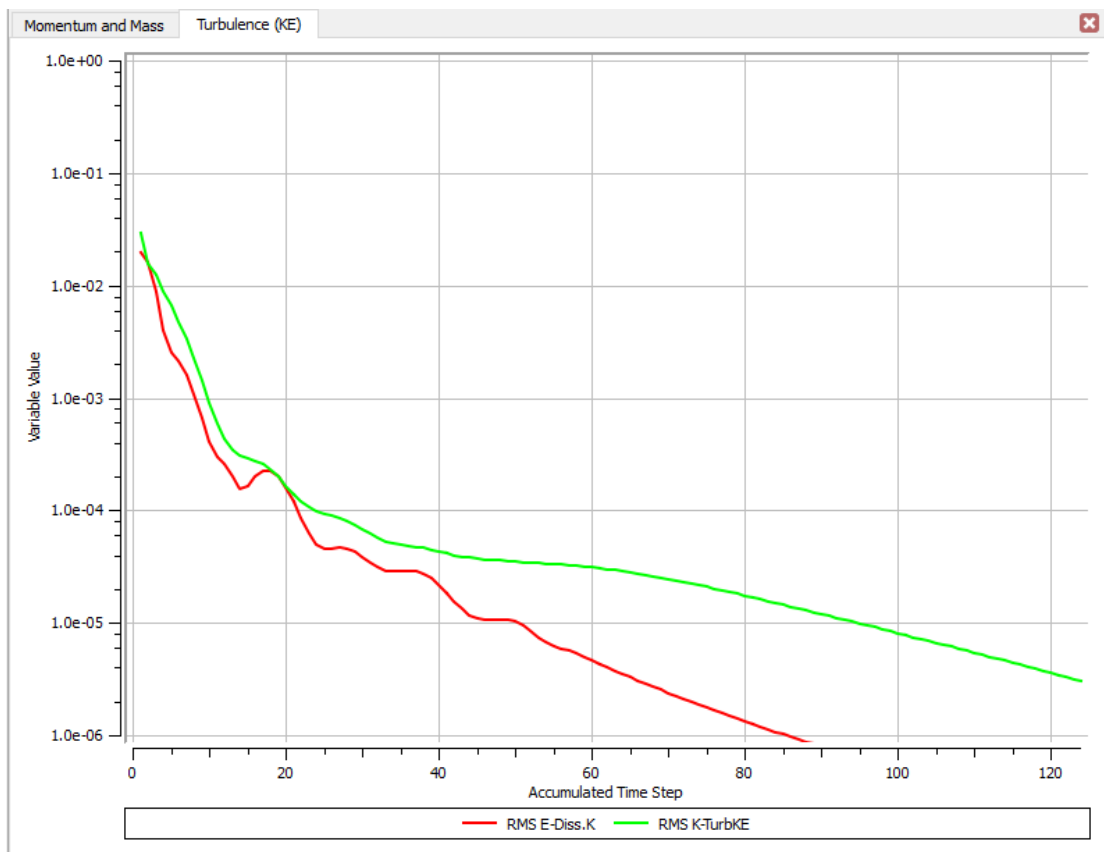
En grafica 5. Se observa el valor de RMS de las ecuaciones de masa (P-Mass) y momentum (U-Mom, V-Mom y W-Mom) del fluido, alcanzando la convergencia a 124 iteraciones al llegar al error RMS de 10^{-5} con un tiempo computacional de 2 minutos y 16 segundos. Los primeros valores RMS en converger son los valores de la gráfica “U-Mom” momentum U (línea verde) con 35 iteraciones seguidamente de “W-Mom” momentum W (línea amarilla) con 38 iteraciones, luego “P-Mass” Masa P (línea roja) con 40 iteraciones y por último “V-Mom” momentum V (línea azul) con 124 iteraciones siendo esta la última ecuación de convergencia para finalizar el estudio. Cada grafica representa un comportamiento único del fluido en todo el dominio para los parámetros de entrada seleccionados.



Gráfica 5. Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 80,4185345 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

En la gráfica 6. se puede observar la convergencia de las ecuaciones de turbulencia a valores RMS entre 10^{-3} y 10^{-6} , alcanzada con 124 iteraciones, con un tiempo computacional de 2 minutos y 16 segundos. La grafica de la turbulencia de disipación (línea roja) desciende rápidamente y converge en un numero de iteraciones aproximado de 90, mientras que la gráfica de turbulencia cinética (línea verde) llega a las 124 iteraciones, siendo su descenso no es tan pronunciado al transcurrir el tiempo en comparación con la anterior.



Gráfica 6. Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K- borde igual a $m = 80,4185345 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

De igual forma se tiene para el Tubo Venturi graficas de convergencia similares para las ecuaciones de masa, momentum, y turbulencia para las distintas simulaciones, las cuales se pueden apreciar en el apendice del presente trabajo de investigacion.

Seguidamente se muestra la tabla 15, donde se podrá observar el número de iteraciones y tiempo ocupacional de cada simulación con los distintos flujo másico.

Tabla 16. Convergencia de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para el dominio del Tubo Venturi.

Fuente. Jiménez, León (2018)

FLUJO MÁSIKO (kg/s)	NÚMERO DE ITERACIONES	TIEMPO COMPUTACIONAL
128,6696552	124	2min y 12seg
386,0089656	125	2min y 1seg
579,0134484	125	2min y 3seg
707,6831036	125	2min y 9seg
3345,411035	125	2min y 2seg
4825,11207	125	3min y 1seg

Campos de Presión, Velocidad y Turbulencia, para las simulaciones en las cuales se trabajó con flujos máxicos iguales a (80,4185345; 128,6696552; 386,0089656; 579,0134484; 707,6831036) Kg/s y $P_s=0$ Pa.

En las figuras de la 44 a la 48, se muestran las presiones, velocidades y turbulencias en el interior del dominio diseñado para el Tubo Venturi con el fin de realizar el respectivo estudio del comportamiento de las diferentes variables a través del dominio y comprender lo que se aprecia en las figuras.

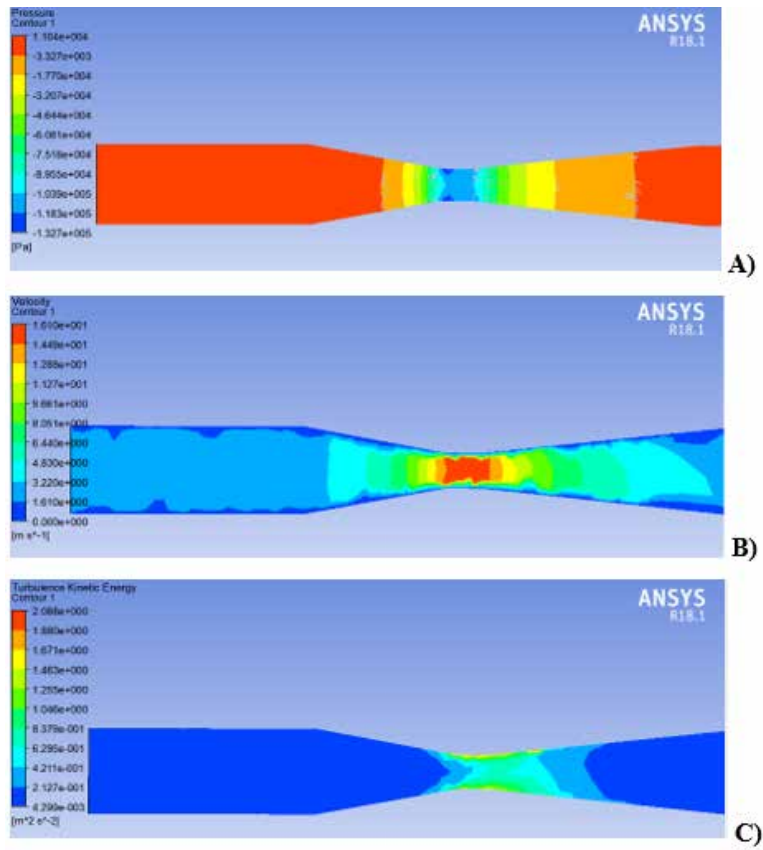


Figura 44. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 80,4185345$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

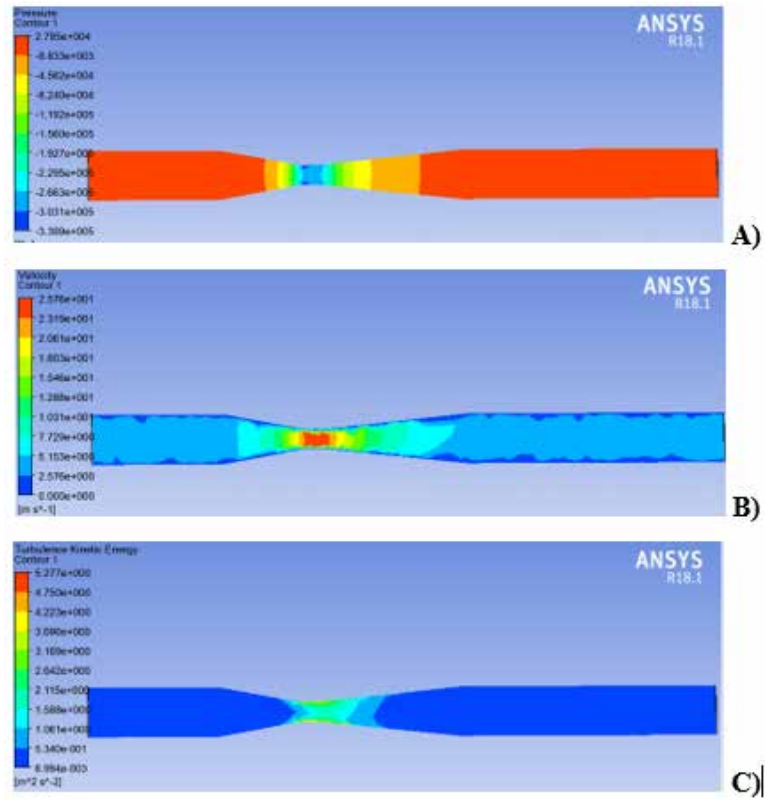


Figura 45. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 128,6696552 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

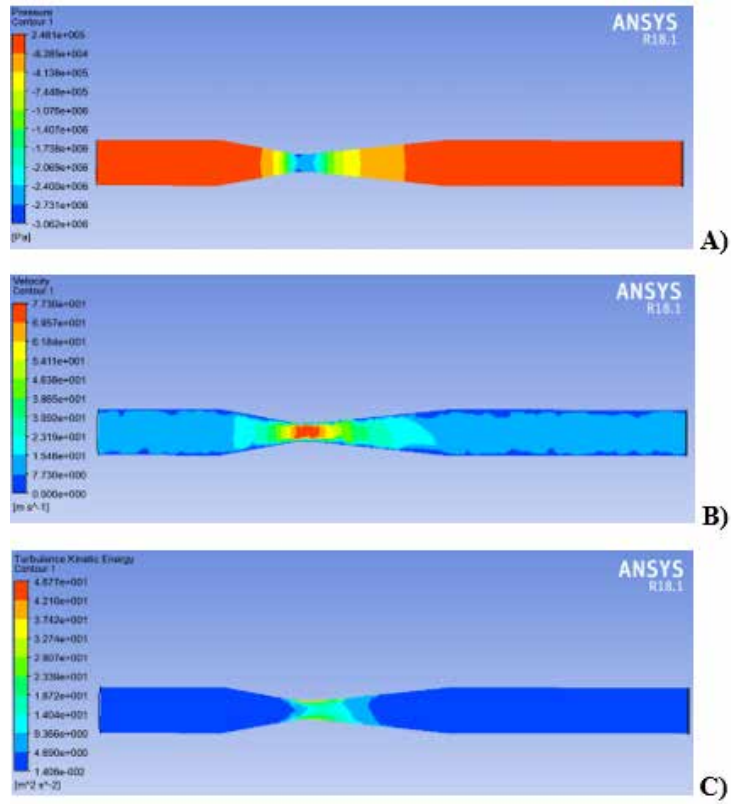


Figura 46. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 386,0089656 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

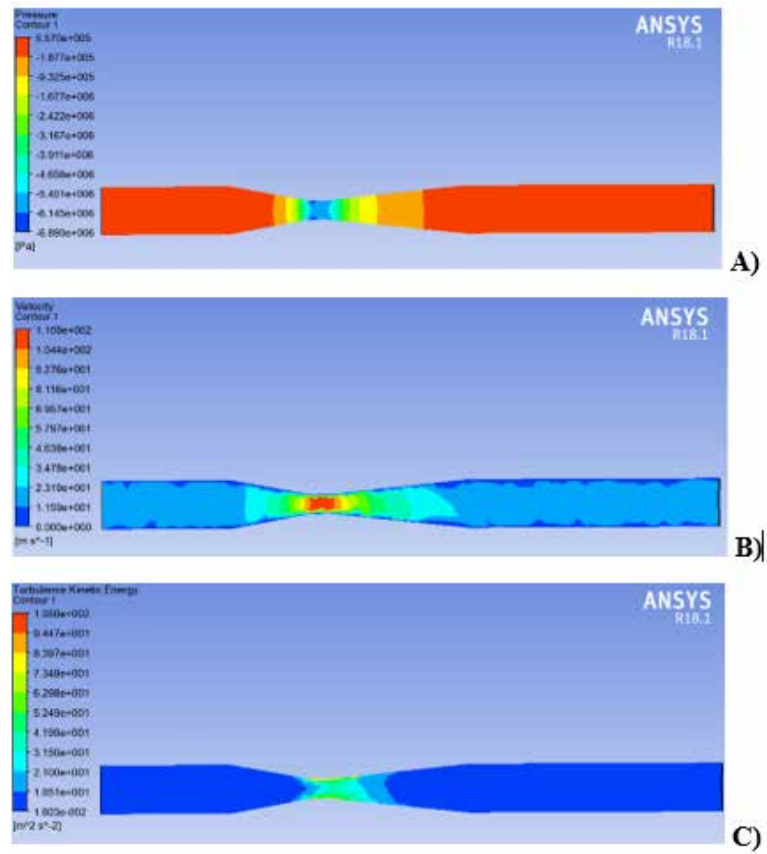


Figura 47. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 579,0134484$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

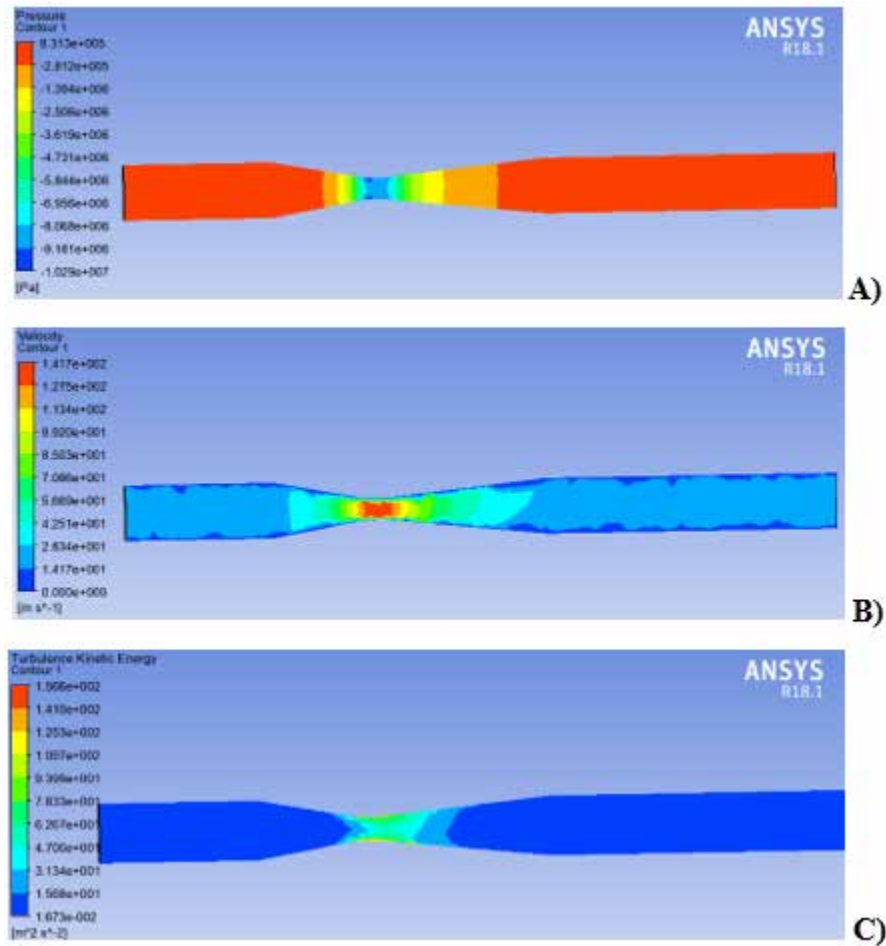


Figura 48. Campo de Presión A) Velocidad B) y Turbulencia C), en el interior del dominio para una configuración de $m = 707,6831036$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

En el intervalo de figuras antes mostradas, se muestran de igual manera que para Placa Orificio los distintos campos de presión, velocidad y turbulencia en el interior del Tubo Venturi para los diferentes flujos máxicos (80,4185345; 128,6696552; 386,0089656; 579,0134484 - 707,6831036) Kg/s y $P_s=0$ Pa, realizando el análisis cualitativo, se puede apreciar de igual manera los diferentes cambios de presión ocurridos, aumento de velocidad y turbulencia. Observando la escala de magnitudes desde el color azul eléctrico (representando la magnitud mínima de la variable de medición) hasta el color rojo (representando el valor máximo de la variable de

medición) pudiendo analizar el comportamiento podemos decir que se observan resultados que concuerdan a lo establecido en las teorías de conservación de la energía y continuidad, porque se logra apreciar un lado de alta presión a la entrada del Tubo Venturi y un lado de baja presión en la garganta, que tiene una tendencia de equilibrio después de la misma, igualmente el aumento de velocidad al pasar el fluido por la garganta (reducción) generando turbulencia cinética a la salida de la misma debido a su elevada velocidad, como se observa en la última imagen de cada figura para cada simulación, resaltando que a pesar de su similitud las magnitudes de las variables son distintas en cada simulación.

Para el análisis de las líneas de flujo y los vectores de velocidad podemos decir que la variación de cada uno con respecto a las distintas simulaciones realizadas es insignificante, sin embargo, realizaremos la comparación de la primera simulación del Tubo Venturi y la última con las figuras 49 y 50.

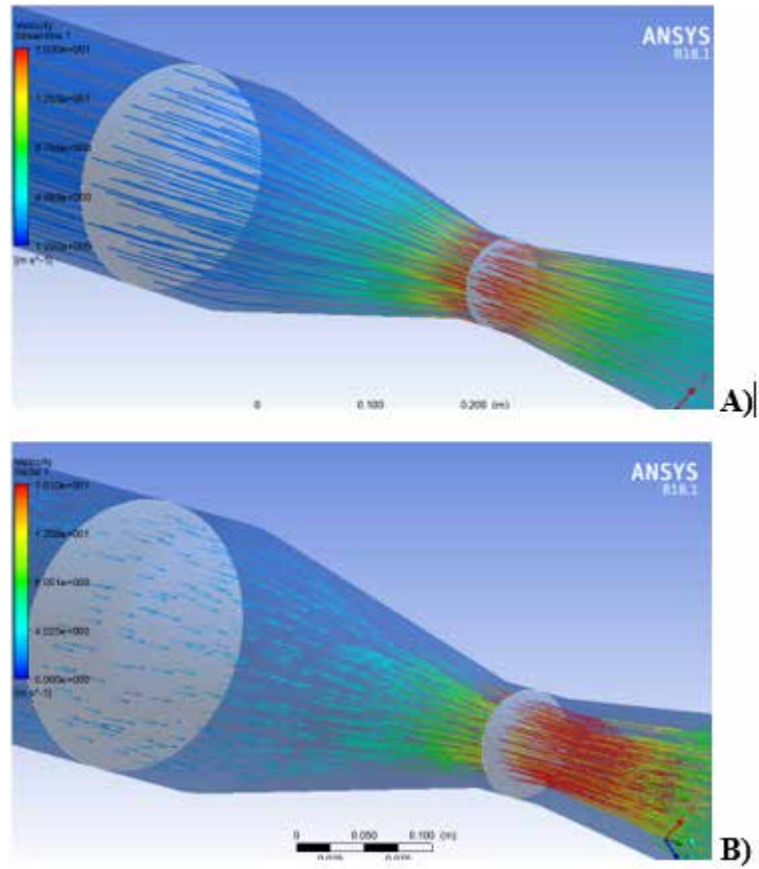


Figura 49. Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 80,4185345 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

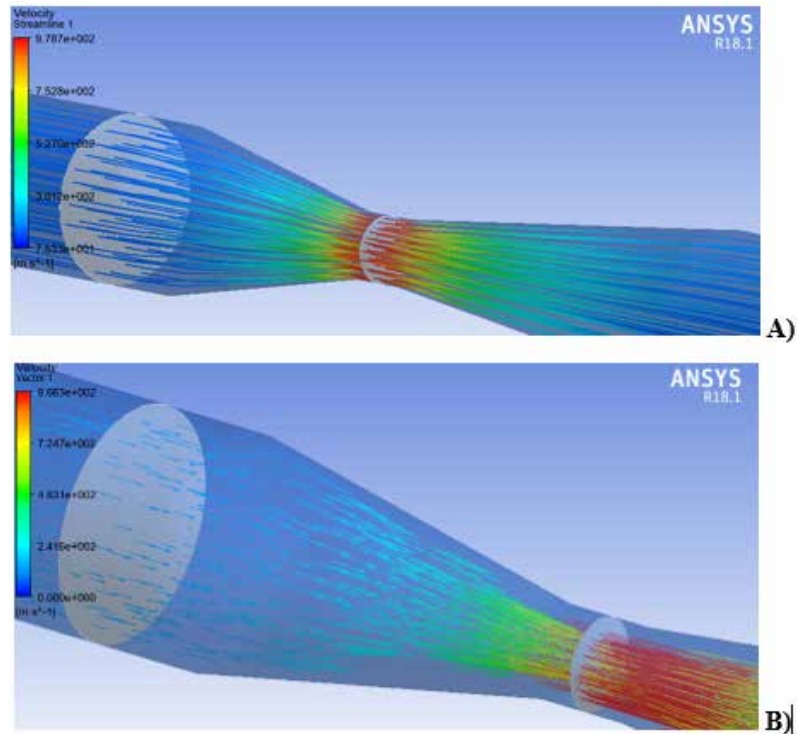


Figura 50. Líneas de Flujo A) y Vectores B) para una configuración simulada de $m = 4825,11207 \text{ Kg/s}$ y $P_s=0 \text{ Pa}$.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

En la figura 49 y 50 se puede observar la similitud en el comportamiento de las líneas de flujo y en los vectores de velocidad, convergiendo en la garganta del Tubo Venturi, con variaciones muy pequeñas con respecto a su dirección, apreciando la escala de colores dentro del Tubo Venturi en ambas figuras se puede ver un comportamiento similar, representándose la velocidad mínima del fluido con el color azul eléctrico y la velocidad máxima el color rojo en la garganta del Tubo Venturi variando a otros colores (magnitudes) en toda la trayectoria del dominio, cabe destacar de igual manera que las magnitudes máximas y mínimas de las velocidades si varía en todas las simulaciones realizadas como se puede apreciar en las escalas de ambas figuras.

4.5. Obtener los resultados en forma de datos y por medio de representaciones gráficas de las variables y parámetros que describen el fenómeno.

A continuación, se muestra los valores arrojados en la simulación, teniendo en cuenta que los valores teóricos fueron mostrados en la fase I. La finalización de esta fase consta en realizar una gráfica comparativa de los valores teóricos obtenidos versus los valores simulados.

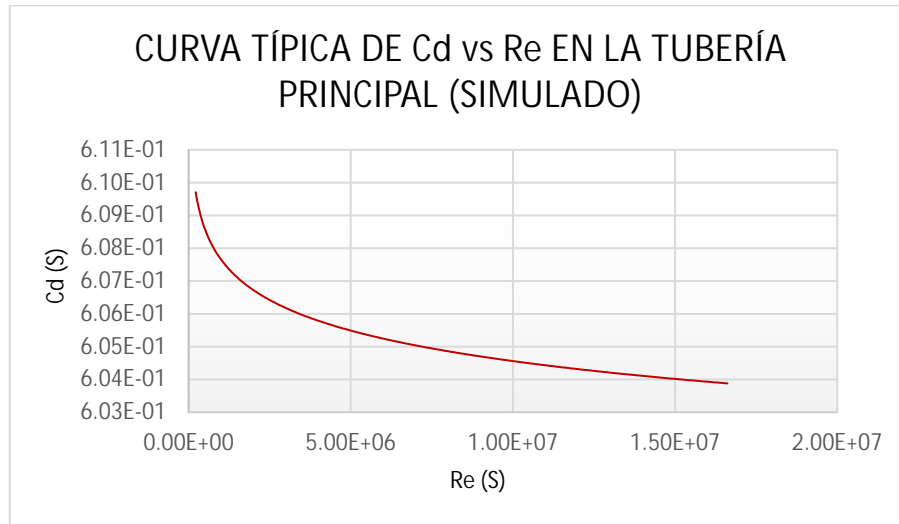
4.5.1 Placa Orificio

Para iniciar se muestra los valores de la Placa Orificio simulados, en la tabla 17, seguidamente se muestra la curva que se genera con los valores de los distintos Coeficientes de Descarga y Número de Reynolds en la gráfica 7.

Tabla 17. Cálculos simulados de la Placa Orificio.

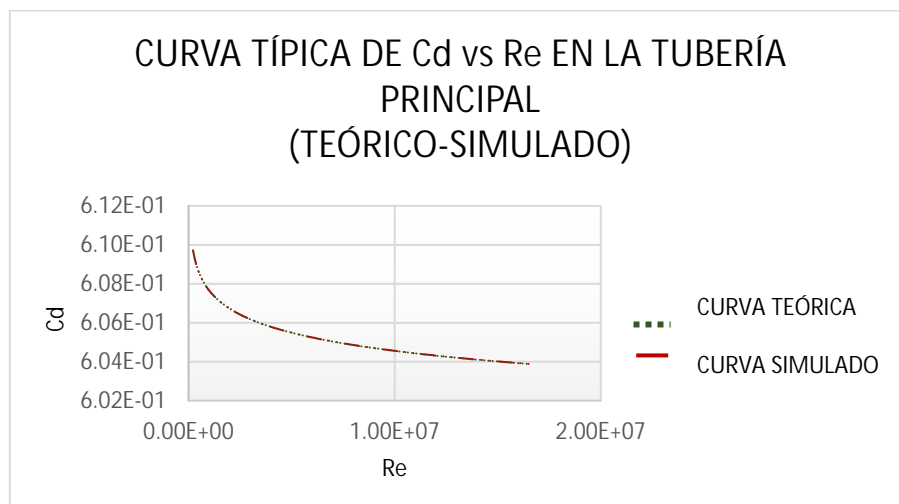
Fuente: Jiménez, León. (2018)

		2,5	2,50886	3,81292	20538,4	-14620,1	35158,5	2,19E+05	1,01E-01	6,10E-01
4,77E-03	2,03E-03	4	4,01437	6,18071	52634,4	-37850,4	90484,8	3,50E+05	6,91E-02	6,09E-01
		12	12,0402	18,231	474720	-340001	814721	1,05E+06	2,87E-02	6,07E-01
		18	18,0582	27,5445	1,06803E+06	-768885	1836915	1,57E+06	2,07E-02	6,07E-01
		22	22,0716	33,1479	1,59697E+06	-1,12038E+06	2717350	1,92E+06	1,77E-02	6,06E-01
0	25°	104	104,381	162,521	3,56515E+07	-2,64289E+07	62080400	9,10E+06	5,10E-03	6,05E-01
		190	190,603	288,715	1,18981E+08	-8,59818E+07	204962800	1,66E+07	3,15E-03	6,04E-01



Gráfica 7. Curva típica de Cd vs Re con valores simulados de una Placa Orificio.
Fuente: Jiménez, León. (2018)

Ahora bien, como se explicó anteriormente, se compara la gráfica de valores teóricos (Gráfica 1) y simulados (Gráfica 7), para apreciar la diferencia que puede existir entre ellas (Gráfica 8)



Gráfica 8. Curva típica de Cd vs Re en una Placa Orificio, mostrando valores teóricos y simulado.
Fuente: Jiménez, León. (2018)

En la representación gráfica 8, no es posible detallar una diferencia visual entre ambas curvas entre ambas curvas y esto se debe a la precisión de las simulaciones según

los criterios de convergencia adoptados. Se puede observar que al aumentar el número de Reynolds el coeficiente de descarga disminuye con una tendencia a estabilizarse para altos números de Reynolds, sin embargo, se pudo estimar el error absoluto entre ambos datos del Cd (teórico vs simulado) como se puede apreciar en la tabla 18.

Tabla 18. Error absoluto para la Placa Orificio.

Fuente: Jiménez, León. (2018)

Cdt teórico	Cdt simulado	Error
0,6105	0,6004	1,67%
0,6092	0,5992	1,67%
0,6071	0,5971	1,68%
0,6065	0,5965	1,68%
0,6063	0,5963	1,68%
0,6048	0,5948	1,68%
0,6044	0,5944	1,68%

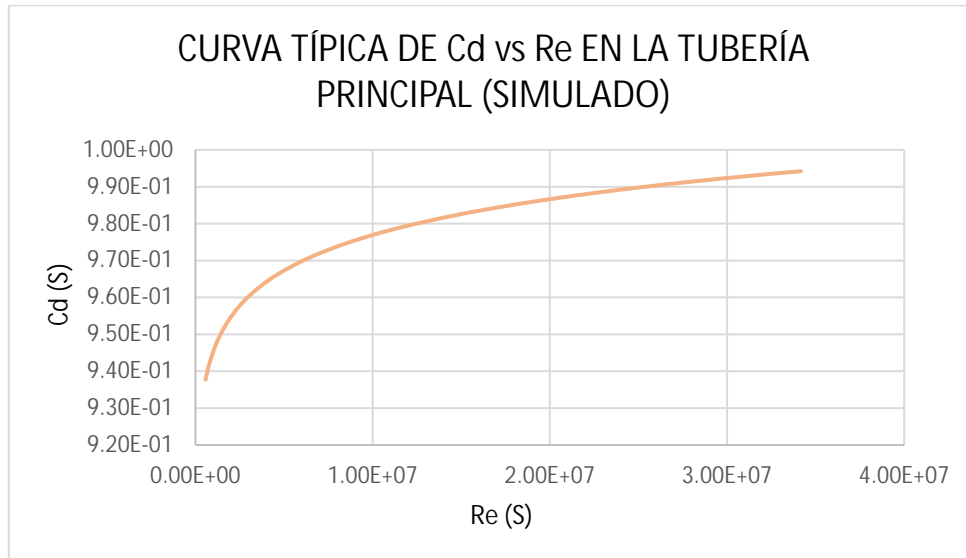
4.5.2 Tubo Venturi

Seguidamente, en la tabla 18, se puede observar los valores arrojados en la simulación, del diseño del Tubo Venturi seleccionado, para luego mostrar la curva que se genera, con los valores de los diferentes Coeficientes de Descarga y Número de Reynolds (Ver gráfica 9).

Tabla 19. Cálculos simulados del Tubo Venturi

Fuente: Jiménez, León. (2018)

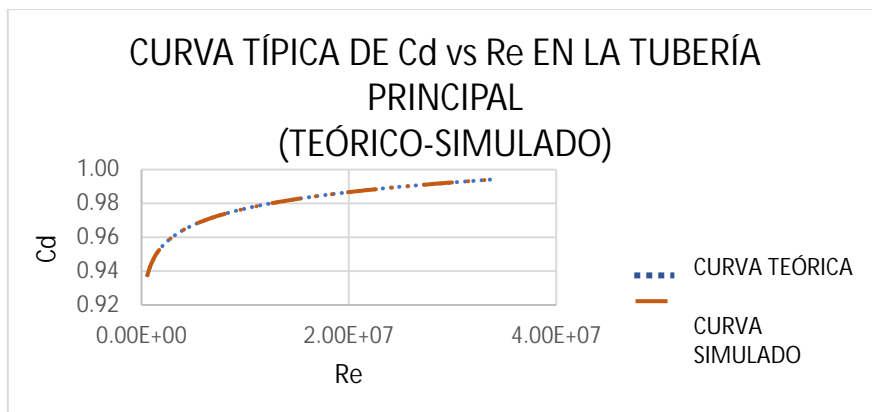
		2,51081	15,7424	10622,3	-114838	5,70E+05	9,29E-01	125460,3
3,23E-02	5,16E-03	4,01731	25,188	26866,4	-294181	9,11E+05	9,43E-01	321047,4
		12,0519	75,5644	238298	-2,6497E+06	2,73E+06	9,66E-01	2887998
		18,0779	113,347	534786	-5,96265E+06	4,10E+06	9,71E-01	6497436
		22,0952	138,535	798113	-8,90763E+06	5,01E+06	9,74E-01	9705743
0	25	104,45	654,894	1,77744E+07	-1,99096E+08	2,37E+07	9,86E-01	216870400
		150,649	944,559	3,69647E+07	-4,14176E+08	3,42E+07	9,88E-01	451140700



Gráfica 9. Gráfico de una curva típica de Cd vs Re con valores simulados en el Tubo Venturi.

Fuente: Jiménez, León. (2018)

Para el diseño del Tuvo Venturi también se realizó una gráfica comparativa, donde se puede apreciar las curvas que generan el Coeficiente de Descarga y los Números de Reynolds, con las condiciones que ya conocemos teóricas (Grafica 2) y simulado (Gráfico 9), notando la mínima diferencia que existe entre ellas. (Ver gráfica 10).



Gráfica 10. Curva típica de Cd vs Re con valores teóricos y simulados en el Tubo Venturi.

Fuente: Jiménez, León. (2018)

De igual forma para el Tubo Venturi, a nivel de representaciones gráficas no es factible detallar una diferencia visual entre ambas curvas, cumplen la tendencia esperada de acuerdo a las bases teórica, a medida que aumenta el número de Reynolds aumenta el coeficiente de descarga y el mismo tiene un comportamiento constante según la tendencia de la curva para altos números de Reynolds, sin embargo, de igual forma que en análisis anterior, se pudo estimar el error absoluto entre ambos datos del Cd (teórico vs simulado) como se puede apreciar en la tabla 19.

Tabla 20. Error absoluto para el Tubo Venturi.

Fuente: Jiménez, León. (2018)

Cd teórico	Cd simulado	Error
0,9286	0,9188	1,07%
0,9428	0,9330	1,06%
0,9655	0,9556	1,04%
0,9712	0,9613	1,03%
0,9736	0,9637	1,03%
0,9860	0,9760	1,02%
0,9877	0,9778	1,02%

4.6 Describir de los resultados basados en los principios físicos de la mecánica de fluidos.

Los resultados obtenidos en la presente investigación a partir del uso de técnicas de aproximación numérica de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) al campo de flujo incompresible a través de dos dispositivos fluxómetros de uso frecuente en la industria como lo son la palca orificio y el tubo de Venturi, muestran según las representaciones gráficas de los contornos, campo de vectores y líneas de corriente que el flujo sufre una contracción espacial en la dirección longitudinal de la tubería, lo que provoca un incremento de la velocidad y posterior desarrollo de fenómenos hidrodinámicos, tales como vórtices, rompimiento de la capa límite e incremento de la turbulencia cinética típicos en estos casos y ampliamente documentados en textos de mecánica de fluidos.

El campo de flujo sufre una disminución en la presión estática, producto del aumento de la presión dinámica en la zona de contracción y viceversa, es decir, aumento de la presión estática a expensas del decremento de la presión dinámica en las zonas de expansión del flujo, ambos fluxómetros presentan la misma descripción fenomenológica, lo que indica que los resultados de las simulaciones están dentro de lo físicamente esperado, o lo que es igual, no violan el principio de la conservación de la energía.

Pudo demostrarse según los datos obtenidos que, como consecuencia de ello, el aumento de velocidad del fluido debe verse compensado por una disminución de su presión, como se pudo apreciar en las figuras de los campos de velocidad, presión, obtenidos en el capítulo 4 para cada simulación.

Basado en el teorema de Bernoulli también podemos verificar las tendencias de las gráficas C_d vs Re de ambos medidores, a partir de la ecuación 37. Introduciendo los datos obtenidos con respecto a las $V_2(S)$ y el $P(S)$ para ambos medidores tomando en cuenta que en el Tubo Venturi se manejan velocidades superiores a la de la placa orificio por ende diferenciales de presión superiores, se deduce un incremento en el valor del C_d en correlación del Re los cuales tiende a generar esa tendencia en la gráfica, en cambio en la placa orificio ocurre lo opuesto, las velocidades no son tan elevadas en correlación con el diferencial de presión, generando una disminución en el valor del C_d aunque el número de Re este aumentando en la tubería.

En la mayoría de los resultados obtenidos es evidente que trabajamos con números de Reynolds mayores a 2300 es decir siempre trabajamos en estado Turbulento; en vista de la complejidad de las ecuaciones numéricas y su gran magnitud para resolver estos fenómenos ocurridos dentro de los medidores, no se pudo obtener un modelo matemático, sin embargo, el programa por medio de la solución turbulencia $K-\epsilon$ permitió calcular la turbulencia cinética en el punto más crítico de cada medidor, es decir en la garganta del Tubo Venturi y en la salida de la Placa Orificio. El programa por medio de Navier-Stokes (RANS) promediada por Reynolds, descomponer el vector

de velocidad de acuerdo con la descomposición de Reynolds para definir la energía cinética turbulenta, Gracias a esto podemos comprobar que en ambos medidores en esos puntos en específicos se crea una elevada turbulencia cinética, siendo la variable fundamental para esto la velocidad del fluido en este punto, cumpliendo los fundamentos de Reynolds y Navier-Stokes.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se realizó el análisis numérico del campo de flujo a través del dominio fluidizado, en dos diferentes tipos de medidores de flujo, considerando agua como el fluido de trabajo, por medio de la aplicación de las ecuaciones de gobierno en el campo de flujo, gracias a una discretización espacial del dominio (mallado), respetando los criterios estadísticos de calidad con un valor alejado del rango pero no por mucha diferencia, tomando como condición de borde; flujo másico como condición de borde en la entrada y presión en la descarga como condición de borde de salida; todo esto para que el comportamiento del fluido se aproxime realmente a la realidad física que ocurre en estos procesos lo que ayudo a obtener unos resultados parecidos a los reales.

Se logró alcanzar la convergencia de las ecuaciones de gobierno y el modelo matemático de turbulencia K- ϵ , para todos los flujos másicos establecidos como condición de borde, logrando apreciar las zonas de mayor turbulencia cinética.

El medidor de Placa Orificio obtuvo un mayor número de iteraciones para lograr convergencia, ya que, comparado con la geometría con el Tubo Venturi, es mucho más grande, sin embargo, estos medidores de flujos no necesitan tantas iteraciones para obtener convergencia.

Durante el análisis numérico al dominio fluidizado de la Placa Orificio y el Tubo Venturi, donde se obtuvieron resultados esperados orientados al comportamiento de la curva característica C_d vs Re , este resultado se pudo validar comparándolo con la curva característica realizada teóricamente. La utilización de una herramienta como ANSYS CFX es adecuada para realizar los análisis numéricos por método de volúmenes finitos, ya que los resultados se adaptan a la realidad física del funcionamiento del flujo en los medidores de flujos, sin recurrir a la necesidad de construir bancos de ensayos, ya que al ser una herramienta computacional se puede lograr controlar o disminuir los fenómenos físicos que se encuentran presentes en el campo de flujo, como zonas

propensas a recibir daños por cavitación clásica o por recirculación, otra ventaja de esta herramienta es que resulta menos engorroso el desarrollar un análisis mediante esta herramienta que hacerlo manualmente, ya que los resultados obtenidos son los esperados y se aproximan a los obtenidos de manera experimental, además se evita el error humano que puede intervenir.

El modelo matemático del comportamiento fluidodinámico del fluido está dado por seis ecuaciones diferenciales parciales no lineales, la ecuación de continuidad para fluido incompresible, tres ecuaciones de momentum (una ecuación vectorial tridimensional) y dos ecuaciones de turbulencia. El resultado para los diferentes Re , demuestra un estado turbulento para ambos medidores de flujos, sin embargo, fue utilizado el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, modelo que tiene buena precisión con un costo computacional aceptable.

RECOMENDACIONES

Luego de culminado este trabajo especial de grado, surgen algunas interrogantes que se presentan interesantes de desarrollar en trabajo futuros. Algunas de ellas son las siguientes:

Realizar estudio en los otros tipos de Placa Orificios y Tubo Venturi

Obtener conocimiento en ANSYS CFX

Ampliar el estudio para el análisis numérico de flujo no isotérmico y así verificar la influencia de la transferencia de calor sobre los resultados arrojados.

Incluir en el pensum de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez una materia enfocada a estudio de la dinámica de fluidos computacional para relacionar a los estudiantes con esta rama de la física y ampliar los estudios en materias de la rama Termo-Hidráulica.

Incluir al diseño accesorios que acompañan a los medidores de flujo, tomando en cuenta las pérdidas que generan, conociendo la diferencia que existe en el sistema y poder compararlo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias, F. (2006). **El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica**, 5ta edición. Caracas, Venezuela. Episteme.

Balestrini, M. (2006). **Como se elabora el proyecto de investigación**, 7ma edición. Caracas, Venezuela. Panapo

Elementos primarios de caudal y Placas de Orificio, WIKA blog, (14/03/2018) [En Línea] Disponible:

<http://www.bloginstrumentacion.com/productos/caudal/elementos-primarios-de-caudal-placas-de-orificio/>

Grawitz, M. (1975). **Métodos de Investigación Social**. 1ra edición. Buenos Aires, Argentina. Amorrortu.

H Irving Shames. (1995). “**Mecánica De Fluidos**”. 3ra edición. Colombia. [En línea]. Disponible:

<https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/mecanica-de-fluidos-shames.pdf>

Hurtado, J (2008). **El proyecto de Investigación**. 6ta edición. Caracas, Venezuela. Koontz

Lorenzo C. “**Placas de orificio, Cálculo y Diseño**”. (14/03/2018) [En Línea] Disponible:

<https://lorenzocarbonell.com/articulos/placas-de-orificio-calculo-y-diseno/>

Martin A. Domingo (1997-2011) “**Apuntes De Mecánica De Fluidos**” [En línea]. Disponible:

<http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>

Medidores de flujos, Web del Profesor, (14/03/2018) [En Línea] Disponible:

http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/medidoresflujovolumetrico/sensoresdeflujovolumetrico.html

Mott R, (2000). “**Mecánica de fluidos aplicada**”. 4ta Edición. México. Roma Tomas Vázquez.

Sabino, C (1992). **El proceso de investigación**. 1ra edición. Caracas, Venezuela. Panapo.

Sarango R. Fernando J. (2015) "**Elaboración de Modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para Medidores de Flujos Volumétricos y Validación Experimental**" [Trabajo de grado]. Guayaquil-Ecuador.

APÉNDICE A

Ø nominal (Pulgadas)	"A" (Pulgadas ±1/64)					"B"	C	T	W
	25 lb.	125 lb. 150 lb.	250 lb. 300 lb.	400 lb.	600 lb.	25 lb. a 900 lb.	pulgadas ±1/64	Nota 1 pulgadas +0.000 -0.010	Nota 2 pulgadas
1		2-5/8	2-7/8	2-7/8	2-7/8			0.020	
1-1/4		3	3-1/4	3-1/4	3-1/4			0.025	
1-1/2		3-3/8	3-3/4	3-3/4	3-3/4			0.030	0.115 a
2		4-1/8	4-3/8	4-3/8	4-3/8			1/32	0.130
2-1/2		4-7/8	5-1/8	5-1/8	5-1/8				
3		5-3/8	5-7/8	5-7/8	5-7/8				
3-1/2		6-3/8	6-1/2	6-3/8	6-3/8	3	1		
4	6-7/8	6-7/8	7-1/8	7	7-5/8			1/16	
5	7-7/8	7-3/4	8-1/2	8-3/8	9-1/2				
6	8-7/8	8-3/4	9-7/8	9-3/8	10-1/2				
8	11-1/8	11	12-1/8	12	12-5/8				0.115 a
10	13-5/8	13-3/8	14-1/4	14-1/8	15-3/4			1/8	0.135
12	16-3/8	16-1/8	16-5/8	16-1/2	18				
14	18	17-3/4	19-1/8						
16	20-1/2	20-1/4	21-1/4						
18	22	21-5/8	23-1/2						
20	24-1/4	23-7/8	25-3/4			3-1/2	1-1/2	1/4	0.240 a
24	28-3/4	28-1/4	30-1/2						0.260

Tabla de dimensiones de la Placa Orificio Seleccionada.

Fuente: Catálogo N.º 500 de Placa Orificio, marca WEINZ

APÉNDICE B

Tamaño nominal de la tubería (pulgadas)	Diámetro exterior		Grosor de la pared		Diámetro interior			Área de flujo	
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(pic)	(mm)	(pie ²)	(m ²)
1/8	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660 × 10 ⁻⁷
1/4	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717 × 10 ⁻⁶
3/8	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236 × 10 ⁻⁵
1/2	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960 × 10 ⁻⁵
3/4	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437 × 10 ⁻⁵
1	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574 × 10 ⁻⁵
1 1/8	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653 × 10 ⁻⁵
1 1/2	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314 × 10 ⁻⁴
2	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168 × 10 ⁻⁴
2 1/2	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090 × 10 ⁻⁴
3	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768 × 10 ⁻⁴
3 1/2	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.281 × 10 ⁻⁴
4	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213 × 10 ⁻⁴
5	5.563	141.3	0.258	6.55	5.047	0.4206	128.2	0.139 0	1.291 × 10 ⁻³
6	6.625	168.3	0.280	7.11	6.065	0.5054	154.1	0.200 6	1.864 × 10 ⁻³
8	8.625	219.1	0.322	8.18	7.981	0.6651	202.7	0.347 2	3.226 × 10 ⁻³
10	10.750	273.1	0.365	9.27	10.020	0.8350	254.5	0.547 9	5.090 × 10 ⁻³
12	12.750	323.9	0.406	10.31	11.938	0.9948	303.2	0.777 1	7.219 × 10 ⁻³
14	14.000	355.6	0.437	11.10	13.126	1.094	333.4	0.939 6	8.729 × 10 ⁻³
16	16.000	406.4	0.500	12.70	15.000	1.250	381.0	1.227	0.1140
18	18.000	457.2	0.562	14.27	16.876	1.406	428.7	1.553	0.1443
20	20.000	508.0	0.593	15.06	18.814	1.568	477.9	1.931	0.1794
24	24.000	609.6	0.687	17.45	22.626	1.886	574.7	2.792	0.2594

Tabla de tubería de Acero calibre 40

Fuente: Mecánica De Fluidos Aplicada Robert Mott 4^{ta} Edición.

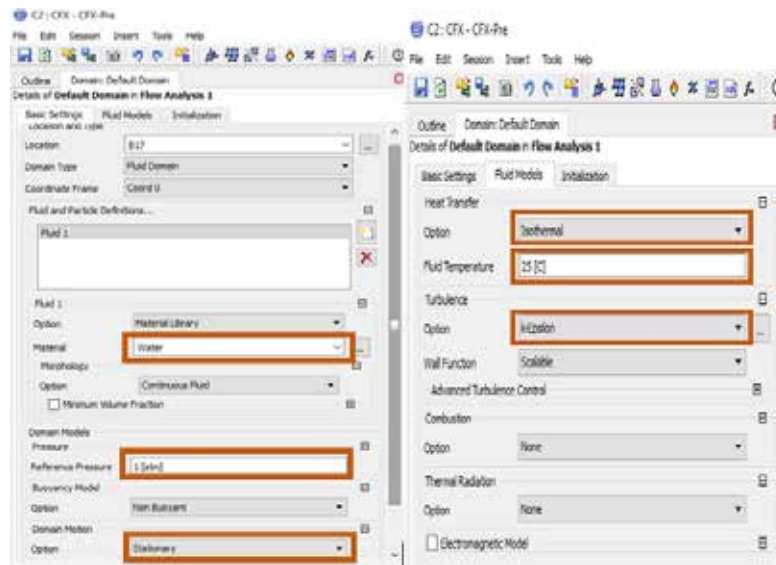
APÉNDICE C

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica μ (Pa · s) o (N · s/m ²)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Tabla de Propiedades físicas del agua

Fuente: Mecánica De Fluidos Aplicada Robert Mott 4^{ta} Edición.

APÉNDICE D

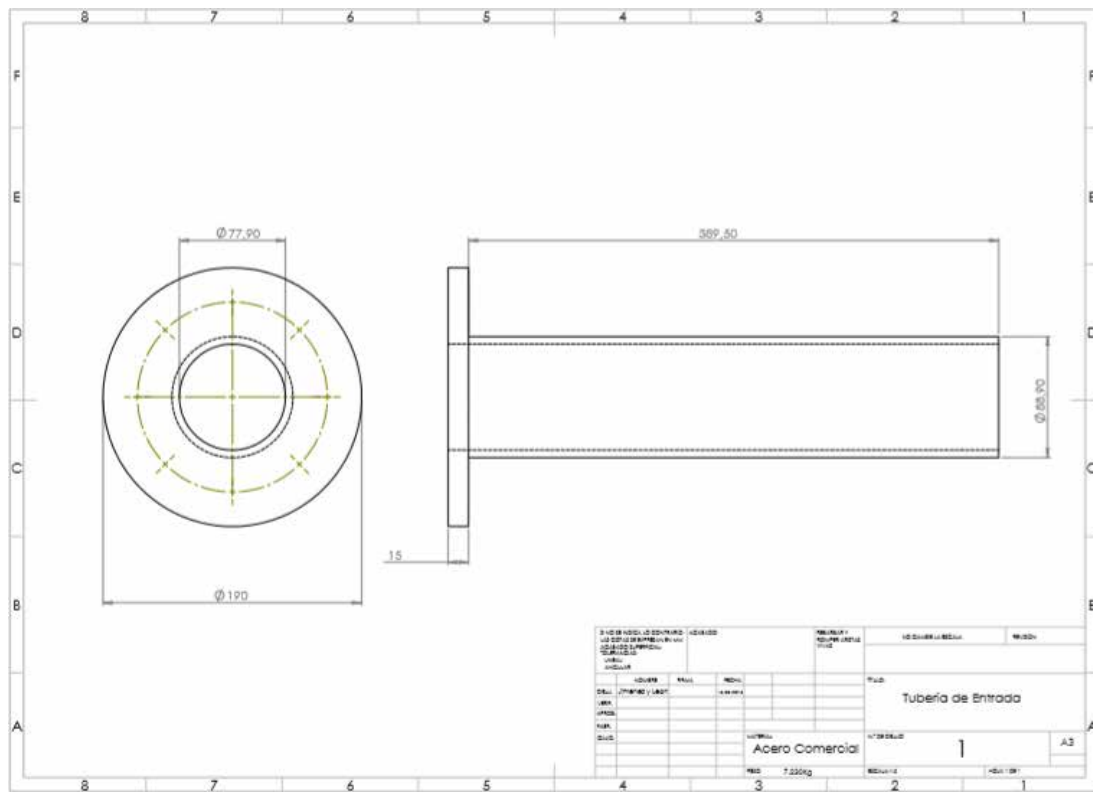


Configuración del Default Domain para ambos diseños.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

APÉNDICE E

Planos de la Placa Orificio.

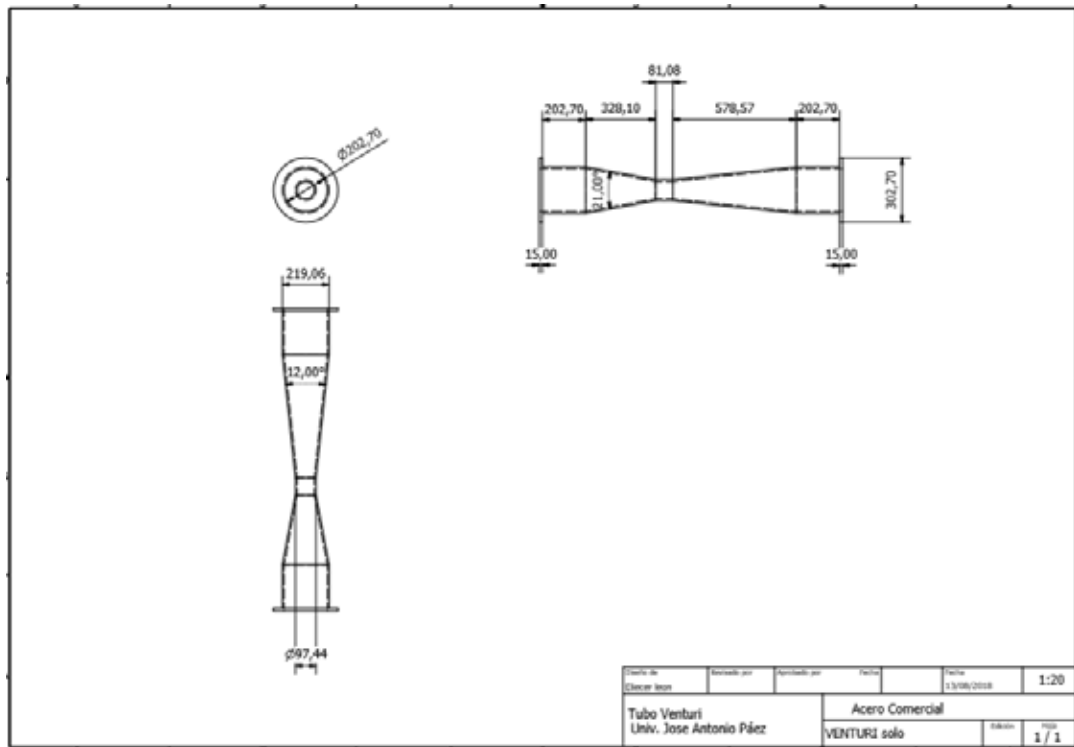


Plano de Tubería de Entrada de la Placa Orificio. Escala 1:5, Acero Comercial, Peso: 7,230Kg

Fuente: Jiménez, León (2018)

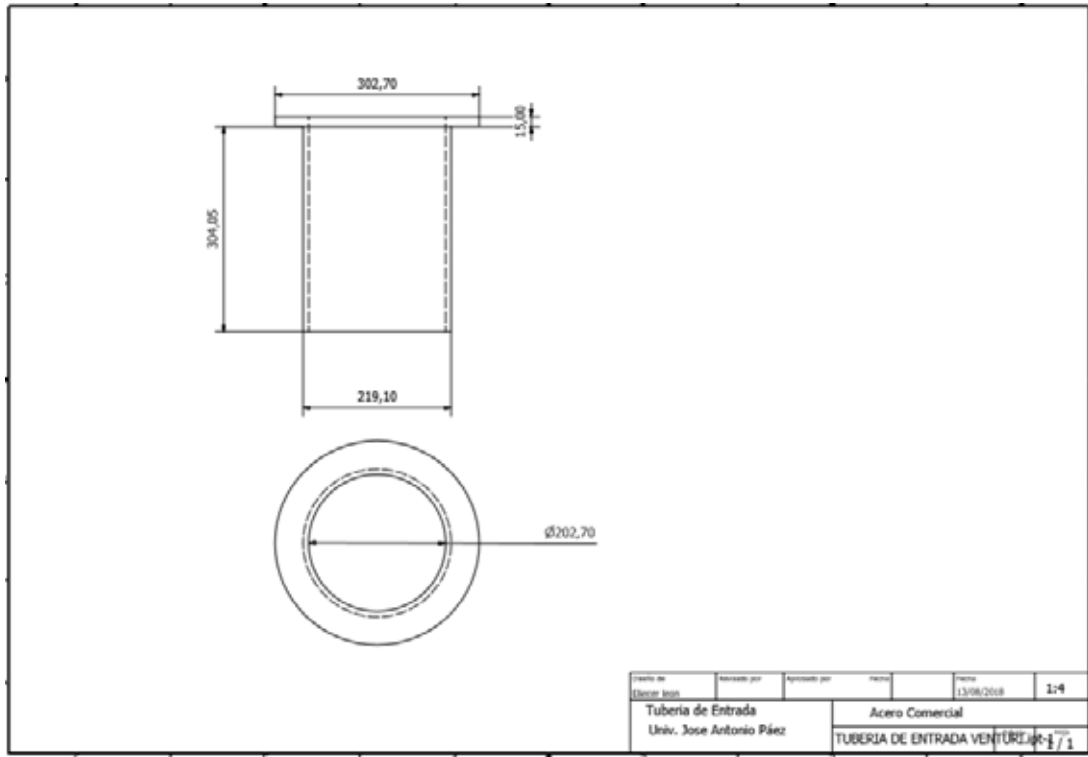
APÉNDICE F

Planos del Tubo Venturi.



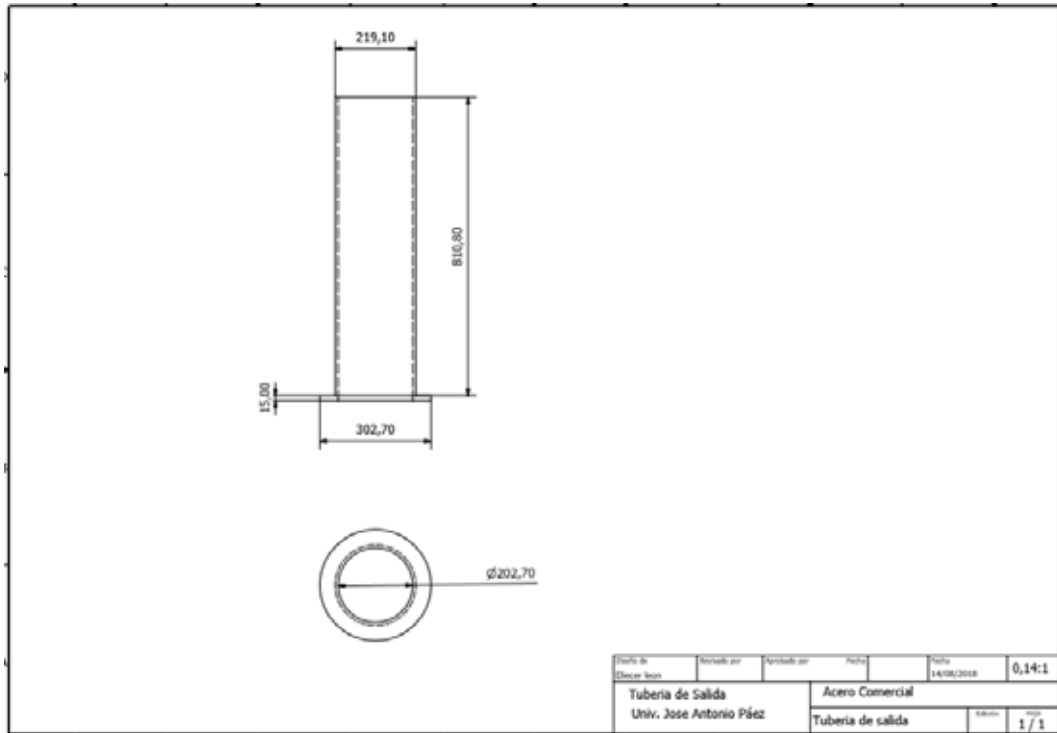
Plano del Tubo Venturi. Escala: 1:20, Acero Comercial, Peso:56,2 kg

Fuente: Jiménez, León (2018)



Plano de Tubería de Entrada. Escala: 1:4, Acero Comercial, Peso: 17,6 Kg

Fuente: Jiménez, León (2018)

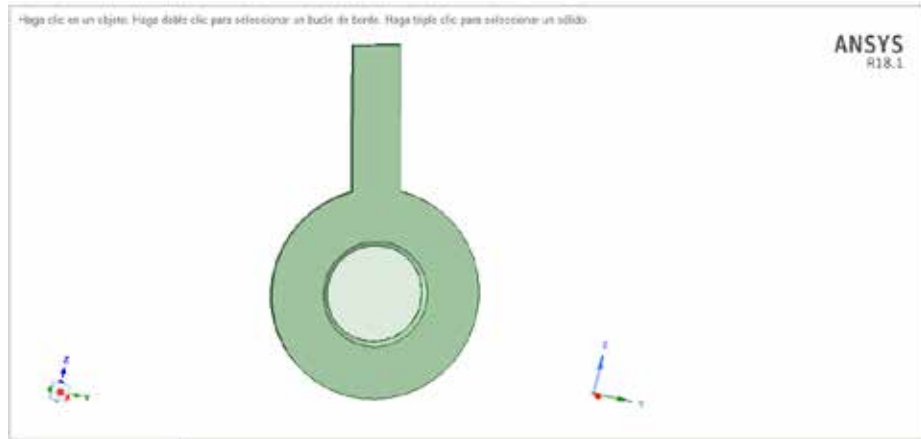


Plano de Tubería de Salida. Escala: 0,14:1, Acero Comercial, Peso:39,2 Kg

Fuente: Jiménez, León (2018)

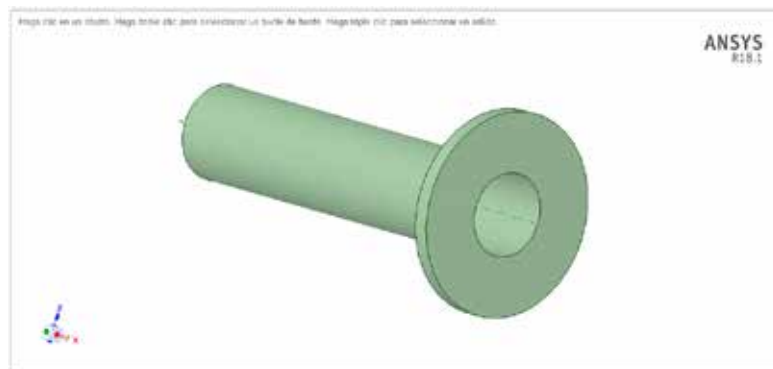
APÉNDICE G

Diseño CAD para la Placa Orificio.



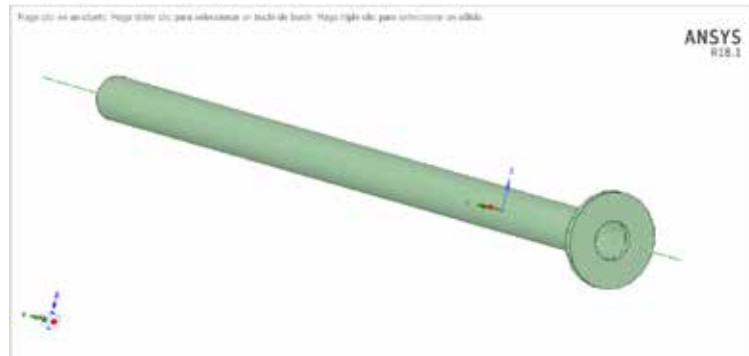
Modelado de la Placa Orificio, por la herramienta CAD ANSYS.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).



Tramo de tubería aguas arriba, por la herramienta CAD ANSYS.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

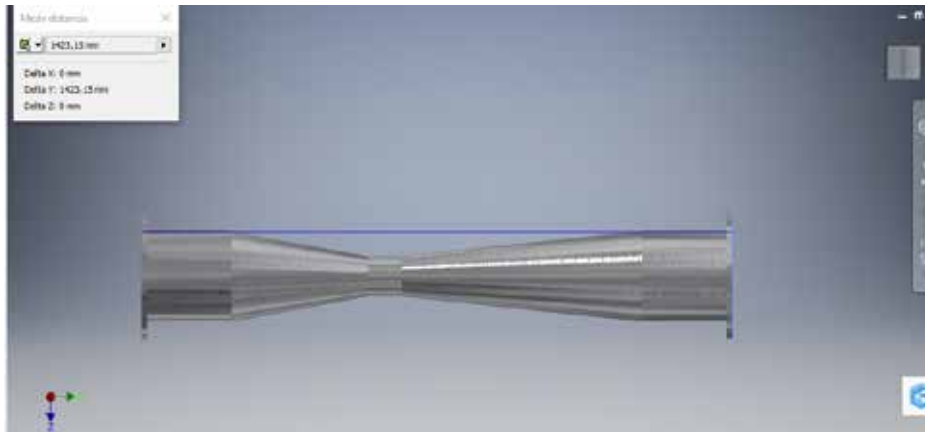


Tramo de tubería aguas abajo, por la herramienta CAD ANSYS.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).

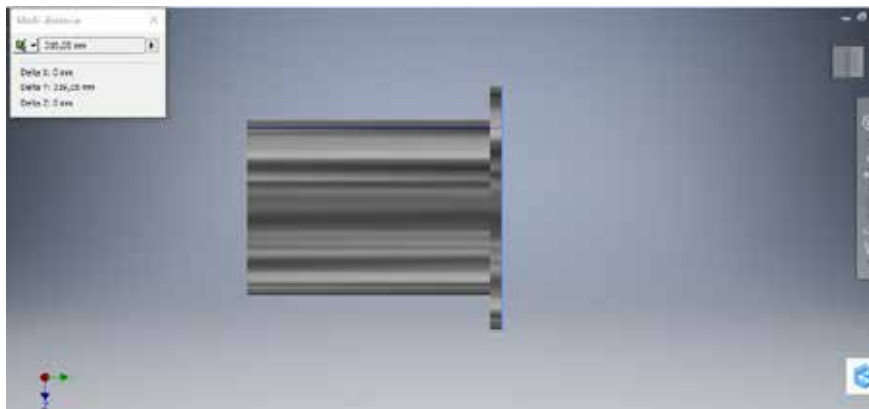
APÉNDICE H

Diseño CAD para el Tubo Venturi.



Tubo Venturi, por la herramienta CAD INVENTOR PROFESIONAL.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).



Tramo de tubería aguas arriba, por la herramienta CAD INVENTOR PROFESIONAL.

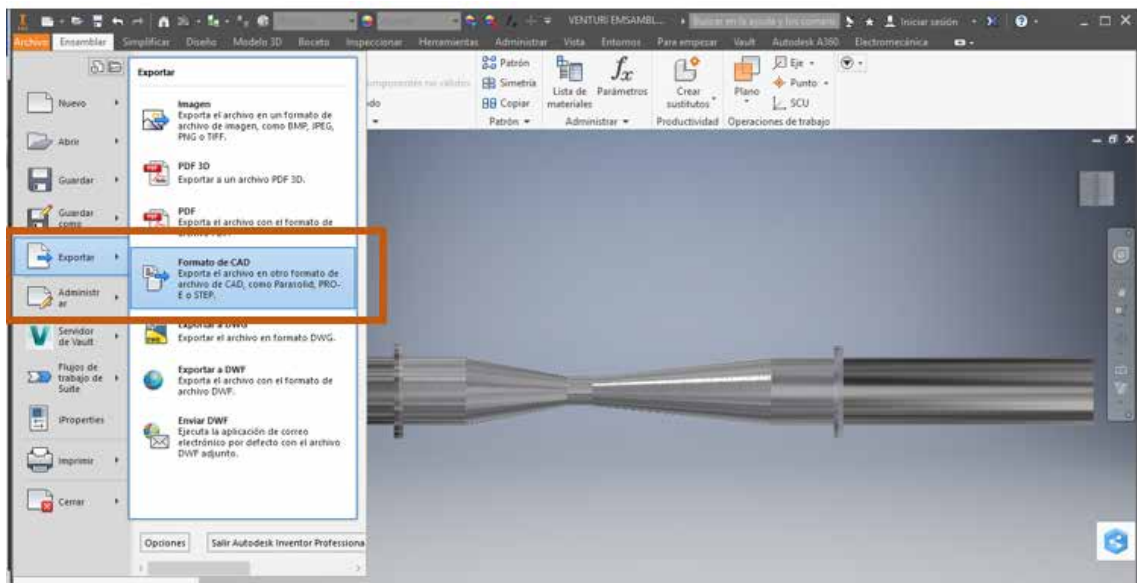
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

Para finalizar, sigue el tramo de tubería aguas abajo. Para luego ser unidas las piezas del diseño del Tubo Venturi.



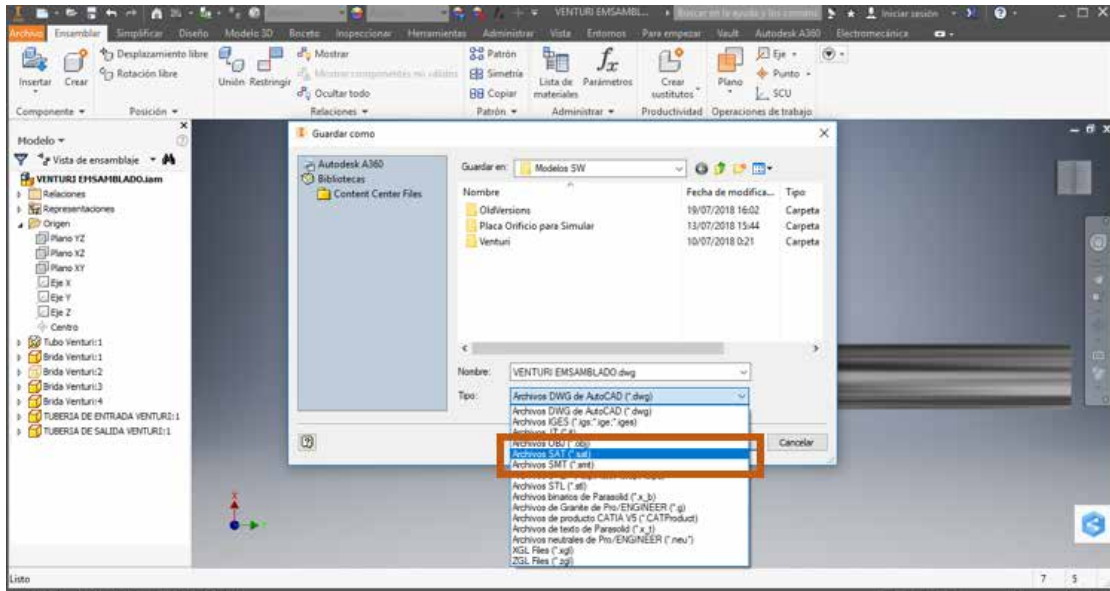
Tramo de tubería aguas abajo, por la herramienta CAD INVENTOR PROFESIONAL.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).



Exportando archivo CAD.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).



Escogiendo formato (*.SAT).

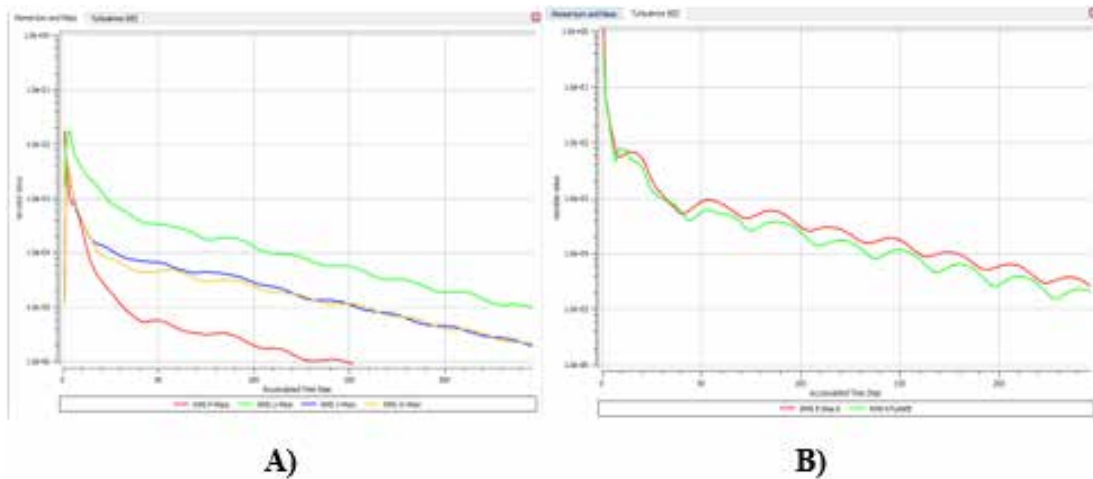
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

APÉNDICE I

Graficas de convergencia RMS de las ecuaciones de gobierno y turbulencia para la Placa Orificio y el Tubo Venturi.

A continuación, se muestran los resultados que no se mostraron en el capítulo IV por su gran cantidad, pero que igualmente forman parte de los resultados alcanzados durante este trabajo de grado. Se muestran las curvas de convergencia de los resultados del valor del error RMS de las ecuaciones de gobierno y Turbulencia, para diferentes flujos máscicos simulados en los distintos medidores.

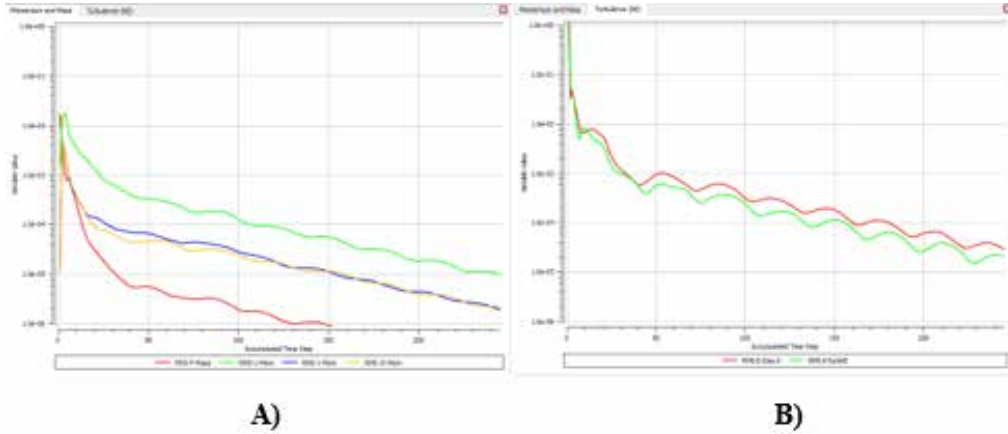
Graficas de convergencia RMS de las ecuaciones de gobierno y Turbulencia para la Placa Orificio.



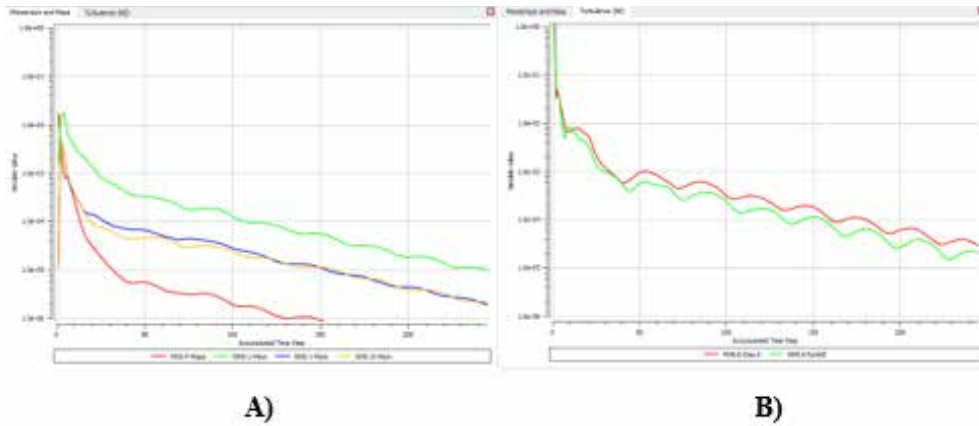
A) Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 19,01726336$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

B) Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K-
igual a $m =19,01726336$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018)

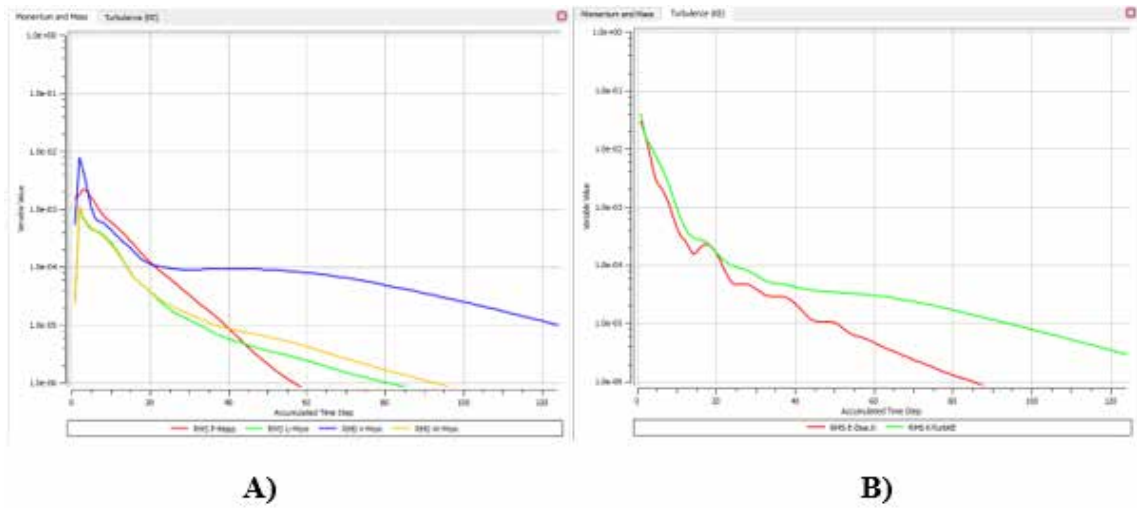


- A) Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 85,57768512$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.
 B) Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K-
 igual a $m = 85,57768512$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).



- A) Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 494,4488474$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.
 B) Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K-
 igual a $m = 494,4488474$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.
Fuente: Jiménez, Leon (2018).

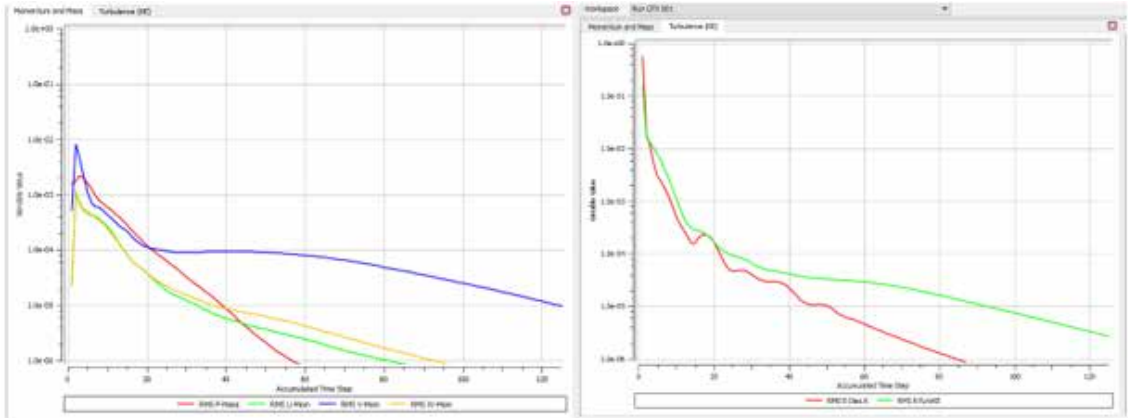
Graficas de convergencia RMS de las ecuaciones de gobierno y Turbulencia para el Tubo Venturi.



A) Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 128,6696552$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

B) Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K-
igual a $m = 128,6696552$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).



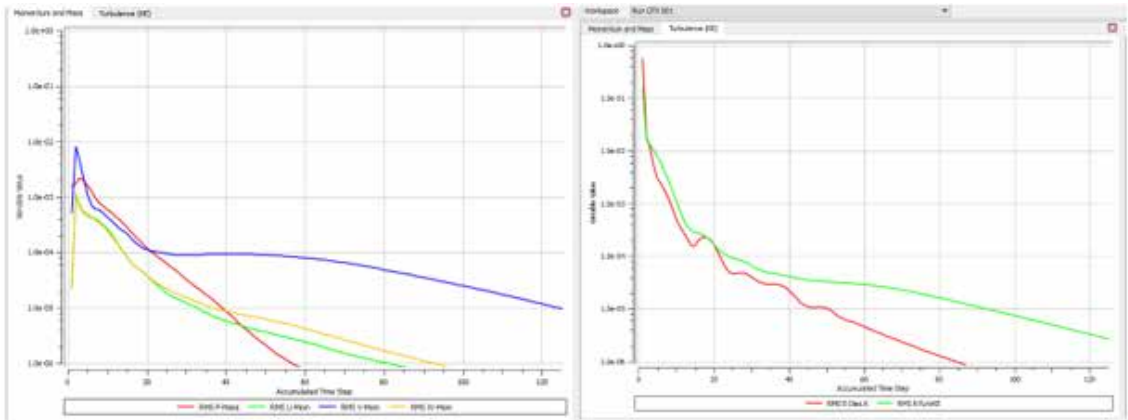
A)

B)

A) Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 579,0134484$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

B) Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K- igual a $m = 579,0134484$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018).



A)

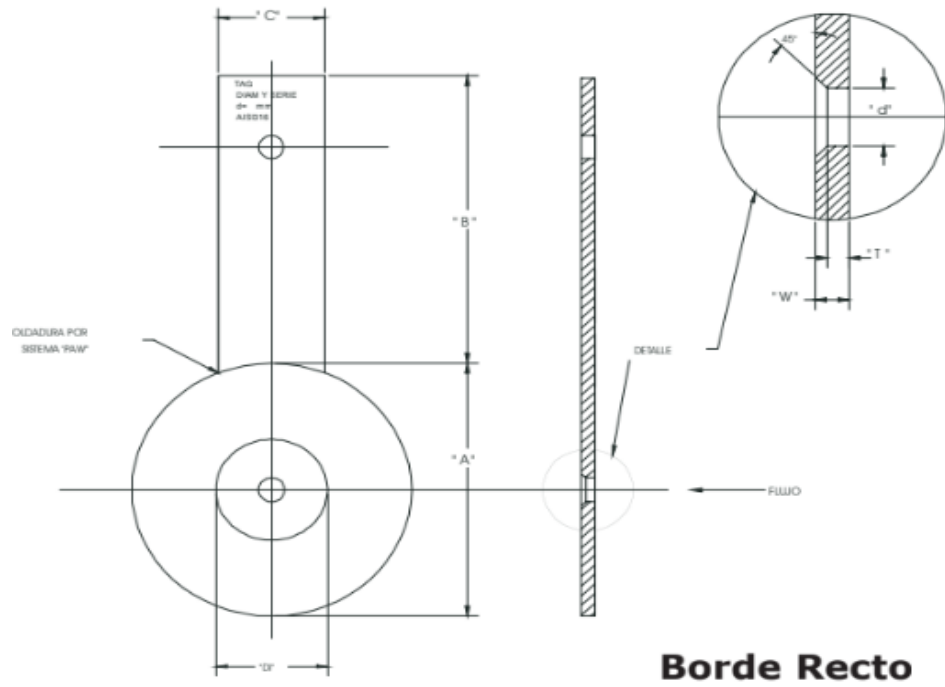
B)

A) Convergencia de las ecuaciones de masa y momento (RMS), para condiciones de borde igual a $m = 3345,411035$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

B) Convergencia de las ecuaciones de turbulencia K- igual a $m = 3345,411035$ Kg/s y $P_s=0$ Pa.

Fuente: Jiménez, Leon (2018)

ANEXOS



Diseño de la Placa Orificio Seleccionada

Fuente: Catálogo N.º 500 de Placa Orificio, marca WEINZ

Tubo Venturi, modelo FLC-VT-WS, de chapa de metal

Descripción

El modelo FLC-VT-WS es un tubo Venturi clásico fabricado de chapas metálicas soldadas. En el caso de diámetros nominales reducidos, la zona del cuello se fabrica de una sola pieza.

Proporción Beta

0,4 ... 0,7

Número de Reynolds

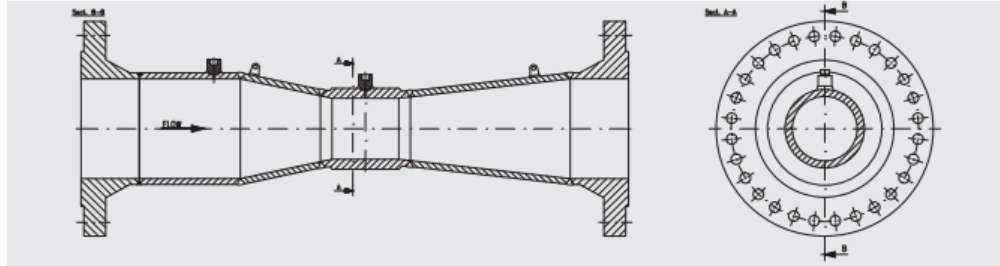
$2 \times 10^5 \dots 1 \times 10^6$

Diámetro nominal

200 ... 1.200 mm

Exactitud

$\leq \pm 1,5 \%$ del valor final de caudal



Indicaciones relativas al pedido

Modelo / Diámetro nominal / Espesor de pared del tubo / Presión nominal / Superficie de sellado / Puntos de toma de presión / Material

Tubo Venturi, modelo FLC-VT-WS, de chapa de metal

Fuente: Catalogo de Tubo Venturi WIKA.