



T
620.106
SAR.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**"Elaboración de Modelos de Dinámica de Fluidos Computacional
(CFD) para Medidores de Flujos Volumétricos y Validación
Experimental"**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
(TESIS DE GRADO)**

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Fernando Jamil Sarango Rodríguez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la oportunidad de cumplir unas de mis metas.

A mi familia; en especial a mis padres que me han ayudado incondicionalmente durante toda mi vida; y me mostraron que con responsabilidad, esfuerzo y amor todo es posible en esta vida.

Al Ing. Mario Patiño Aroca por brindarme su ayuda con el desarrollo de la presente tesis; además de haber tenido confianza en mí persona mucho tiempo como su ayudante de cátedra.

Fernando J. Sarango Rodríguez

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de grado a Dios.

Además dedico esta tesis de grado a mis padres Fernando Sarango y Magaly Rodríguez; que mediante sus enseñanzas morales, ánimos y amor durante toda mi vida; me han ayudado a cumplir esta meta. A mi hermana, amigos y profesores que me brindaron todo su apoyo durante mi vida universitaria en la ESPOL.

Fernando J. Sarango Rodríguez

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jorge Duque R.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Mario Patiño A.
DIRECTOR DEL TFG

Sarango Rodríguez

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo Final de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Fernando Jamil Sarango Rodríguez

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo elaborar modelos de medidores de flujo volumétricos usando dinámica de fluidos computacional (ANSYS-CFX) y validar los resultados mediante mediciones experimentales. Se utilizó el banco de prueba "Medidores de flujo" disponible en el laboratorio de Termofluidos de la Facultad en Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP-ESPOL). Este banco de prueba posee un venturi, una placa orificio y un rotámetro; este último será excluido de este estudio.

Se realizaron modelos en CFD de los medidores de flujos volumétricos venturi y placa orificio. Estos modelos CFD fueron desarrollados en condiciones idénticas de operación y escala 1:1 respecto al modelo físico, para dicho desarrollo se utilizó el software ANSYS-CFX de volúmenes finitos; el cual proveyó de la herramienta necesaria para generar el mallado y la resolución de cada modelo CFD.

La geometría de los medidores de flujo se elaboró con la ayuda del programa SolidWorks 2014, para luego importarlo al software ANSYS-CFX en formato IGES (.igs) y proseguir de esta manera con el desarrollo de la simulación. Para cada modelo CFD se realizó un volumen de control que contenía el volumen de agua que atraviesa todo el medidor de flujo; es decir desde el

punto donde se toman las lecturas manométricas de presión de entrada y salida del modelo físico. Las simulaciones se realizaron en estado estacionario, condición de flujo isotérmico y se utilizó el modelo de turbulencia k- ϵ . Debido a que el CFD promedia las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) surge el tensor de esfuerzo de Reynolds el cual debe ser modelado para obtener un sistema cerrado de ecuaciones, el modelo de turbulencia k- ϵ muestra de una mejor manera el efecto turbulento del fluido; proporcionando 2 ecuaciones adicionales para el cálculo de la viscosidad turbulenta. Este modelo se enfoca en los mecanismos que afectan a la energía cinética turbulenta y asume que la viscosidad turbulenta es isotrópica, por esta razón es el modelo adecuado para este estudio.

Se realizaron mediciones de presiones a la entrada y salida de cada medidor de flujo volumétrico a diferentes caudales; esto permitió graficar, analizar y comparar el comportamiento del coeficiente de descarga a diferentes números de Reynolds para cada medidor de flujo volumétrico. La validación se la realizó al comparar las gráficas obtenidas con datos experimentales y con datos obtenidos con CFD, usando el software ANSYS-CFX. Con esta comparación se concluyó que el CFD tiene una alta precisión en determinar el comportamiento del fenómeno físico que experimenta el fluido al atravesar los medidores de flujo volumétricos.

Adicionalmente se realizó una guía de práctica de laboratorio de Mecánica de fluidos; cuya práctica consistirá en realizar mediciones en el banco de prueba "Medidores de flujo" y luego proseguir las indicaciones de la guía para elaborar el modelo CFD, mediante el cual los estudiantes podrán realizar las gráficas y conclusiones respectivas de los resultados experimentales y los obtenidos mediante el software ANSYS-CFX.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ABREVIATURAS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	4
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivos generales.....	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1.3 Metodología de desarrollo.....	9
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Fundamentos de mecánica de fluidos.....	11
2.1.1 Fluido.....	11
2.1.2 Caudal.....	13

2.1.3	Número de Reynolds.....	13
2.1.4	Tipos de flujos.....	14
2.1.4.1	Flujo laminar.....	15
2.1.4.2	Flujo turbulento.....	15
2.1.5	Caída de presión.....	16
2.1.6	Teorema de Bernoulli.....	16
2.1.7	Coefficiente de descarga.....	19
2.1.8	Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos en forma diferencial.....	20
2.1.8.1	Ecuación diferencial de conservación de la masa..	21
2.1.8.2	Ecuación diferencial de cantidad de movimiento....	23
2.1.8.3	Ecuación diferencial de la energía.....	25
2.2	Medidores de flujo.....	26
2.2.1	Tipos de medidores de flujo.....	27
2.2.1.1	Venturi.....	27
2.2.1.2	Placa orificio.....	28
2.2.1.3	Determinación de coeficiente de descarga.....	30
2.2.2	Aplicaciones.....	33
2.3	Fundamentos de dinámica de fluidos computacional (CFD).....	35
2.3.1	Antecedente del CFD.....	35
2.3.2	Las matemáticas de la técnica CFD.....	38
2.3.3	Metodología del CFD.....	43

2.3.3.1 Geometría/mallado.....	43
2.3.3.2 Definición física.....	44
2.3.3.3 Solucionador (solver).....	44
2.3.3.4 Post-procesador.....	45
2.3.4 Discretización numérica de las ecuaciones gobernantes por el método de volúmenes finitos.....	46
2.3.5 Modelos de turbulencia.....	47
2.3.6 Algoritmos de solución.....	50
2.4 Software CFD.....	52

CAPÍTULO 3

3. MODELOS CFD.....	55
3.1 Geometría de los medidores.....	55
3.1.1 Geometría del Venturi.....	56
3.1.2 Geometría de la Placa orificio.....	58
3.2 Mallado.....	61
3.2.1 Mallado del Venturi.....	61
3.2.2 Mallado de la Placa orificio.....	63
3.3 Resolución.....	65
3.3.1 Resolución Venturi.....	65
3.3.2 Resolución Placa orificio.....	70
3.4 Resultados CFD.....	75

3.4.1 Resultado Venturi.....	76
3.4.1.1 Contornos de velocidad.....	77
3.4.1.2 Contornos de presión.....	82
3.4.1.3 Comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.....	91
3.4.2 Resultado placa orificio.....	93
3.4.2.1 Contornos de velocidad.....	93
3.4.2.2 Contornos de presión.....	98
3.4.2.3 Comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.....	108
 CAPÍTULO 4	
4. MODELO FÍSICO.....	110
4.1 Banco de prueba.....	110
4.2 Equipos de medición.....	117
4.2.1 Medidor de temperatura.....	118
4.2.2 Manómetro multitubular.....	120
4.2.3 Cronometro.....	121
4.3 Metodología de medición.....	122
4.4 Resultados de medición.....	123
4.4.1 Resultado Venturi.....	124
4.4.1.1 Determinación de coeficiente de descarga.....	125

4.4.1.2 Comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.....	129
4.4.2 Resultado Placa de orificio.....	130
4.4.2.1 Determinación de coeficiente de descarga.....	132
4.4.2.2 Comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.....	135
CAPÍTULO 5	
5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	137
5.1 Análisis de resultados CFD.....	137
5.1.1 Análisis CFD Venturi.....	138
5.1.1.1 Análisis del contorno de velocidad.....	138
5.1.1.2 Análisis del contorno de presión.....	141
5.1.1.3 Análisis del comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.....	144
5.1.2 Análisis CFD Placa orificio.....	145
5.1.2.1 Análisis del contorno de velocidad.....	145
5.1.2.2 Análisis del contorno de presión.....	148
5.1.2.3 Análisis del comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.....	151
5.2 Análisis de resultado del modelo físico.....	152
5.2.1 Análisis del comportamiento del coeficiente de descarga	

a diferente número de Reynolds del Venturi.....	152
5.2.2 Análisis del comportamiento del coeficiente de descarga	
a diferente número de Reynolds de la placa orificio.....	153
5.3 Comparación de resultados.....	155
5.3.1 Comparación de resultados del coeficiente de descarga del	
Venturi.....	155
5.3.2 Comparación de resultados del coeficiente de descarga de la	
placa orificio.....	156

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	158
6.1 Conclusiones.....	158
6.2 Recomendaciones.....	161

APÉNDICES

ANEXO

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	TecEquipment H10.....	6
Figura 1.2	Banco hidráulico gravimétrico.....	7
Figura 1.3	Metodología de desarrollo de la tesis.....	10
Figura 2.1	Esfuerzo cortante en un sólido y en un líquido.....	12
Figura 2.2	Elemento de fluido en una tubería.....	16
Figura 2.3	Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli....	18
Figura 2.4	Flujos de masa en un elemento infinitesimal fijo.....	22
Figura 2.5	Fuerzas que interactúan sobre un elemento infinitesimal fijo en la dirección x.....	23
Figura 2.6	Energías que interactúan con el elemento infinitesimal en la dirección x.....	25
Figura 2.7	Medidor de flujo- tubo Venturi.....	28
Figura 2.8	Medidor de flujo – Placa orificio.....	29
Figura 2.9	Ilustración de curva característica.....	40
Figura 3.1	Dimensiones constructivas para el medidor Tubo Venturi.....	56
Figura 3.2	Geometría del volumen del fluido que atraviesa el medidor tubo venturí en SolidWorks® 2014.....	57
Figura 3.3	Geometría del volumen del fluido que atraviesa el medidor tubo venturí en ANSYS-CFX 14.5.....	58
Figura 3.4	Dimensiones constructivas para el medidor Placa Orificio.....	59
Figura 3.5	Geometría del volumen del fluido que atraviesa el medidor Placa Orificio en SolidWorks® 2014.....	60
Figura 3.6	Geometría del volumen del fluido que atraviesa el medidor Placa Orificio en ANSYS-CFX 14.5.....	60
Figura 3.7	Detalle del mallado del Venturi.....	62
Figura 3.8	Mallado del medidor tubo Venturi.....	62
Figura 3.9	Detalle del mallado de la placa orificio.....	63
Figura 3.10	Detalle de la inflación de la malla.....	64
Figura 3.11	Mallado del medidor placa orificio.....	64
Figura 3.12	Condiciones de frontera del modelo Tubo Venturi.....	67
Figura 3.13	Gráfico de convergencia de variables velocidad x, velocidad y, velocidad z y presión de la primera simulación del medidor de flujo Venturi.....	69

Figura 3.14	Gráfico de convergencia de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta de la primera simulación del medidor de flujo Venturi.....	70
Figura 3.15	Condiciones de frontera del modelo Placa orificio.....	72
Figura 3.16	Gráfico de convergencia de variables velocidad x, velocidad y, velocidad z y presión de la primera simulación del medidor de flujo Placa Orificio.....	74
Figura 3.17	Gráfico de convergencia de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta de la primera simulación del medidor de flujo Placa Orificio.....	75
Figura 3.18	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 25484.8 (primera simulación).....	77
Figura 3.19	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 22972.4 (segunda simulación).....	78
Figura 3.20	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 21051.3 (tercera simulación).....	78
Figura 3.21	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 18910.8 (Cuarta simulación).....	79
Figura 3.22	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 17299.5 (quinta simulación).....	79
Figura 3.23	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 16077.2 (sexta simulación).....	80
Figura 3.24	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 14113.7 (séptima simulación).....	80
Figura 3.25	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 12362 (Octava simulación).....	81
Figura 3.26	Contorno de velocidad del medidor Venturi a Re: 11616.7 (novena simulación).....	81
Figura 3.27	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 25484.8 (primera simulación).....	82
Figura 3.28	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 22972.4 (segunda simulación).....	83
Figura 3.29	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 21051.3 (Tercera simulación).....	83
Figura 3.30	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 18910.8 (cuarta simulación).....	84
Figura 3.31	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 17299.5 (quinta simulación).....	84

Figura 3.32	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 16077.2 (sexta simulación).....	85
Figura 3.33	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 14113.7 (séptima simulación).....	85
Figura 3.34	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 12362 (octava simulación).....	86
Figura 3.35	Contorno de presión del medidor Venturi a Re: 11616.7 (Novena simulación).....	86
Figura 3.36	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 25484.8 (primera simulación).....	87
Figura 3.37	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 22972.4 (segunda simulación).....	87
Figura 3.38	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 21051.3 (tercera simulación).....	88
Figura 3.39	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 18910.8 (cuarta simulación).....	88
Figura 3.40	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 17299.5 (Quinta simulación).....	89
Figura 3.41	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 16077.2 (Sexta simulación).....	89
Figura 3.42	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 14113.7 (séptima simulación).....	90
Figura 3.43	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 12362 (octava simulación).....	90
Figura 3.44	Contorno de presión-plano medio del medidor Venturi a Re: 11616.7 (novena simulación).....	91
Figura 3.45	Grafico coeficiente de descarga vs Número de Reynolds obtenidos mediante CFD.....	92
Figura 3.46	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 12941.8 (primera simulación).....	94
Figura 3.47	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 11713.5 (segunda simulación).....	94
Figura 3.48	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 10733.1 (tercera simulación).....	95
Figura 3.49	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 9638.25 (cuarta simulación).....	95
Figura 3.50	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 8816.1 (quinta simulación).....	96

Figura 3.51	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 7722.24 (sexta simulación).....	96
Figura 3.52	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 6776.61 (séptima simulación).....	97
Figura 3.53	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 5940.65 (octava simulación).....	97
Figura 3.54	Contorno de velocidad del medidor Placa orificio a Re: 5578.23 (novena simulación).....	98
Figura 3.55	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 12941.8 (primera simulación).....	99
Figura 3.56	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 11713.5 (segunda simulación).....	99
Figura 3.57	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 10733.1 (tercera simulación).....	100
Figura 3.58	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 9638.25 (cuarta simulación).....	100
Figura 3.59	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 8816.1 (quinta simulación).....	101
Figura 3.60	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 7722.24 (sexta simulación).....	101
Figura 3.61	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 6776.61 (séptima simulación).....	102
Figura 3.62	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 5940.65 (octava simulación).....	102
Figura 3.63	Contorno de presión del medidor Placa orificio a Re: 5578.23 (novena simulación).....	103
Figura 3.64	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 12941.8 (primera simulación).....	103
Figura 3.65	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 11713.5 (segunda simulación).....	104
Figura 3.66	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 10733.1 (tercera simulación).....	104
Figura 3.67	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 9638.25 (cuarta simulación).....	105
Figura 3.68	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 8816.1 (quinta simulación).....	105
Figura 3.69	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 7722.24 (sexta simulación).....	106

Figura 3.70	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 6776.61 (séptima simulación).....	106
Figura 3.71	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 5940.65 (octava simulación).....	107
Figura 3.72	Contorno de presión-plano medio del medidor Placa orificio a Re: 5578.23 (novena simulación).....	107
Figura 3.73	Grafico coeficiente de descarga vs Número de Reynolds obtenidos mediante CFD	109
Figura 4.1	Banco hidráulico gravimétrico (TecQuipment H1) suministrando flujo a un equipo experimental.....	112
Figura 4.2	Placa técnica del Banco hidráulico gravimétrico.....	114
Figura 4.3	TecQuipment H10 (Banco Medidor de Flujo).....	115
Figura 4.4	Diagrama del Banco Medidor de Flujo (TecQuipment H10)	116
Figura 4.5	Placa técnica del Banco Medidor de Flujo (TecQuipment H10)	117
Figura 4.6	Termómetro infrarrojo marca CEN-TECH.....	120
Figura 4.7	Manómetro multitubular.....	121
Figura 4.8	Bomba de aire manual.....	121
Figura 4.9	Esquema del Medidor Tubo Venturi	125
Figura 4.10	Gráfico de dispersión y regresión de datos experimentales del medidor Venturi.....	129
Figura 4.11	Esquema del Medidor Placa Orificio.....	131
Figura 4.12	Gráfico de dispersión y regresión de datos experimentales del medidor Placa Orificio.....	135
Figura 5.1	Contornos de Velocidad del medidor de flujo Venturi.....	139
Figura 5.2	Contornos de Velocidad del medidor de flujo Venturi en un plano que atraviesa por la mitad al volumen de control.....	140
Figura 5.3	Contornos de Presión del medidor de flujo Venturi.....	142
Figura 5.4	Contornos de Presión del medidor de flujo Venturi en un plano que atraviesa por la mitad al volumen de control.....	143
Figura 5.5	Contornos de Velocidad del medidor de flujo placa orificio...	146
Figura 5.6	Contornos de Velocidad del medidor de flujo placa orificio en un plano que atraviesa por la mitad al volumen de control.....	147
Figura 5.7	Contornos de Presión del medidor de flujo placa orificio....	149
Figura 5.8	Contornos de Presión del medidor de flujo placa orificio en un plano que atraviesa por la mitad al volumen de control	150
Figura 5.9	Comparación de datos experimentales y CFD del medidor Venturi.....	156

Figura 5.10	Comparación de datos experimentales y CFD del medidor Placa orificio.....	157
-------------	--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Unidades estándar para las variables utilizadas en el cálculo del número de Reynolds.....	14
Tabla 2	Métodos numéricos para resolver sistemas de ecuaciones lineales.....	52
Tabla 3	Condiciones de operación	66
Tabla 4	Condiciones de frontera para cada simulación del medidor de flujo Venturi.....	67
Tabla 5	Condiciones de operación.....	71
Tabla 6	Condiciones de frontera para cada simulación del medidor de flujo Placa Orificio	72
Tabla 7	Resultados obtenidos de Coeficiente de descarga y Número de Reynolds del medidor Venturi	92
Tabla 8	Resultados obtenidos de Coeficiente de descarga y Número de Reynolds del medidor Placa orificio.....	108
Tabla 9	Características de termómetro infrarrojo.....	119
Tabla 10	Especificaciones de termómetro infrarrojo.....	119
Tabla 11	Tabla de mediciones obtenidas en el medidor tubo Venturi....	124
Tabla 12	Tabla de variables del coeficiente de descarga del medidor tubo Venturi	127
Tabla 13	Resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el Medidor Tubo Venturi.....	128
Tabla 14	Tabla de mediciones obtenidas en el medidor Placa Orificio....	131
Tabla 15	Tabla de variables del coeficiente de descarga del medidor Placa Orificio.....	133
Tabla 16	Resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el medidor Placa Orificio.....	134

ABREVIATURAS

A	Área
A_m	Magnitud del error aleatorio
atm	atmosfera
β	Vena contracta
B.S	British Standards
c	Porcentaje de confianza
C	Constante empírica
C_d	Coefficiente de descarga
CFD	Computacional Fluid Dynamics, Dinámica de Fluidos Computacional
cm	centímetro
∂	Diferencial
d	Diámetro de la obstrucción
D	Diámetro
DNS	Direct Numerical Simulation, Simulación directa numérica
e	Energía interna
E	Energía total del fluido
E_c	Energía cinética del fluido
E_f	Energía de flujo
E_p	Energía potencial del fluido
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
f_x	Fuerzas de cuerpo en la dirección x
f_y	Fuerzas de cuerpo en la dirección y
f_z	Fuerzas de cuerpo en la dirección z
ft	pie
FIMCP	Facultad en Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
FVM	Finite Volume Method, Método de los volúmenes finitos
g	Gravedad
Hz	Hertz
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
k	Energía cinética turbulenta
K	Constante térmica de conductividad
Kg	Kilogramo

LES	Large Eddy Simulation, Simulación de grandes vórtices
lts	litros
m	Metro
mm	milimetro
\dot{m}	Flujo másico
\dot{m}_r	Flujo másico real
N	Newton
Re	Número de Reynolds
n	Número de muestras
P	Presión
Pa	Pascal
Q	Caudal
Q_r	Caudal real
Q_t	Caudal teórico
r^2	Coefficiente de determinación
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes, Ecuaciones de Navier Stokes Promediadas
RMS	Root Mean Square (Media cuadrática residual)
s	segundo
S_{MS}	Fuente o sumidero externo de masa por unidad de volumen
S_m	Error sistemático
S_r -SSE	Suma de los cuadrados de los residuos
S_t	Magnitud del error residual
S_y	Fuerza externa en dirección y
t	Tiempo
T	Temperatura
u	Velocidad del elemento en la dirección x
μ	Viscosidad dinámica
μ_{ef}	Viscosidad efectiva
μ_t	Viscosidad turbulenta
\bar{u}	Velocidad promedio del fluido
v	Velocidad del elemento en la dirección y
ν	Viscosidad cinemática
u_r	Velocidad real
\vec{V}	Vector velocidad total
VAC	Corriente alterna
VC	Volumen de control
\forall	Volumen

w	Velocidad del elemento en la dirección z
W	Peso del fluido
γ_p	Peso específico del fluido
Z	altura de elevación del fluido
Γ	Contorno del dominio de la variable
Δ	Delta, variación
ρ	Densidad
Ω	Dominio de la variable
σ	Error aleatorio
∇	Operador diferencial Nabla
λ	Segundo coeficiente de viscosidad
ε	Tasa de disipación turbulenta

INTRODUCCIÓN

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 pequeños elementos y resolviendo allí dichas ecuaciones.

La dinámica de fluidos computacional es utilizada en diferentes campos de estudio debido a su gran alcance, bajo costo y confiabilidad en sus resultados obtenidos.

El presente trabajo estudia el comportamiento del fluido en el interior de los medidores de flujos (Placa Orificio y Venturi) a distintas condiciones de operación; y se valida el estudio realizado mediante la comparación con los resultados obtenidos experimentalmente en un banco de prueba de medidores de flujo.

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.

Por esta razón se demuestra que 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 fácilmente según las condiciones en que se encuentra el fluido.

Para este estudio de validación entre lo obtenido experimentalmente y lo obtenido con el CFD se dispondrá de una variable indirecta como es el Coeficiente de descarga (C_d). Se estudiará el comportamiento del coeficiente de descarga de los dos medidores de flujos a diferentes números de Reynolds (Re), esto permite concluir cual es nivel de confiabilidad de la dinámica de fluidos computacional en el estudio del comportamiento del fluido en el interior de los medidores de flujos.

Este estudio permite realizar de manera adicional una práctica de laboratorio de mecánica de fluidos; cuya finalidad será en demostrar al estudiante la alta confiabilidad del CFD en el campo de la Mecánica de fluidos.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

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.

Hoy en día, con el uso de herramientas computacionales en todos los campos de la ingeniería, se ha empezado a utilizar CFD (Computacional Fluid Dynamics o Dinámica de fluidos computacional) para el análisis del

comportamiento del fluido dentro de los medidores de flujo, esto ayuda a optimizar tiempo y dinero para el desarrollo de la medición de los fluidos.

1.1 Planteamiento del Problema

La presente investigación trata sobre la validación de la aplicación del CFD (Computacional Fluid Dynamics o Dinámica de fluidos computacional) en el desarrollo de los medidores de flujos.

Para realizar esta validación se desea determinar el coeficiente de descarga de cada uno de los medidores de flujo a diferentes números de Reynolds; para el cual se debe conocer la caída de presión que producen estos medidores. Esta característica se determinará utilizando dos metodologías: mediciones de campo y modelos CFD.

Para las mediciones de campo se dispone un banco de prueba conformado por dos equipos: TecQuipment H10 y TecQuipment H-1 (banco hidráulico gravimétrico), ambos equipos se encuentran en el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.



FIGURA 1.1 TECQUIPMENT H10

El TecQuipment H10 (medidores de flujo) muestra métodos típicos para medición de fluido incompresible y demuestra las aplicaciones de la ecuación de Bernoulli. Incluye en su parte inferior un medidor Venturí, placa orificio y un difusor. En su parte superior se encuentra el rotámetro (excluido del estudio) y el manómetro de presión (multitubo) para la medición de la caída de presión que produce cada medidor respectivamente.



FIGURA 1.2 BANCO HIDRÁULICO GRAVIMÉTRICO¹

El banco hidráulico gravimétrico (TecQuiment H-1) proporciona un flujo controlado de agua a una amplia variedad de experimentos de laboratorio. Es un tanque colector de agua con una bomba sumergible, un sistema gravimétrico de pesaje y la superficie de trabajo.

El sistema gravimétrico de pesaje es un pequeño depósito interno de un brazo de pivote compensado por pesos. Con un cronómetro se mide la cantidad de agua con la que se llena el tanque para medir el caudal que circuló por el banco de prueba.

¹ www.Tecquipment.com-Datasheet

Para la elaboración de los modelos CFD, se hace uso de un software comercial de análisis de elementos finitos. El software a utilizarse es ANSYS-CFX 14.5, el cual la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción ha adquirido la licencia para su respectivo uso. Para dibujar la geometría tridimensional del volumen interno de los medidores de flujo; se utilizará el programa SOLIDWORKS 2014. Este dibujo será importado al software ANSYS-CFX 14.5; para posteriormente realizar los pasos pertinentes para una correcta simulación.

Utilizando las mediciones de campo y los valores obtenidos mediante el CFD; se procede a calcular el coeficiente de descarga a los diferentes números de Reynolds. Con ello se graficará el coeficiente de descarga en función del número de Reynolds; para de esta manera realizar la respectiva comparación entre lo obtenido experimentalmente y computacionalmente (CFD).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

- Elaborar modelos CFD para los medidores de flujo: Venturí y placa orificio.

- Validar la aplicación del CFD al estudio y desarrollo de los medidores de flujo.
- Inducir al estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica al estudio de la mecánica de fluidos computacional; mediante la realización de una guía práctica usando los equipos mencionados en este estudio.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para cada abertura de la llave de paso del banco de prueba; que permite el flujo de agua desde el banco hidráulico hacia los medidores de flujos, se determina:

- El caudal real.
- El caudal teórico mediante CFD.
- El caudal teórico mediante mediciones de campo.
- El coeficiente de descarga.

1.3 Metodología de desarrollo

En esta sección se explicará la metodología de desarrollo de la presente tesis, mediante el gráfico de la figura 1.3; que se presenta a continuación:

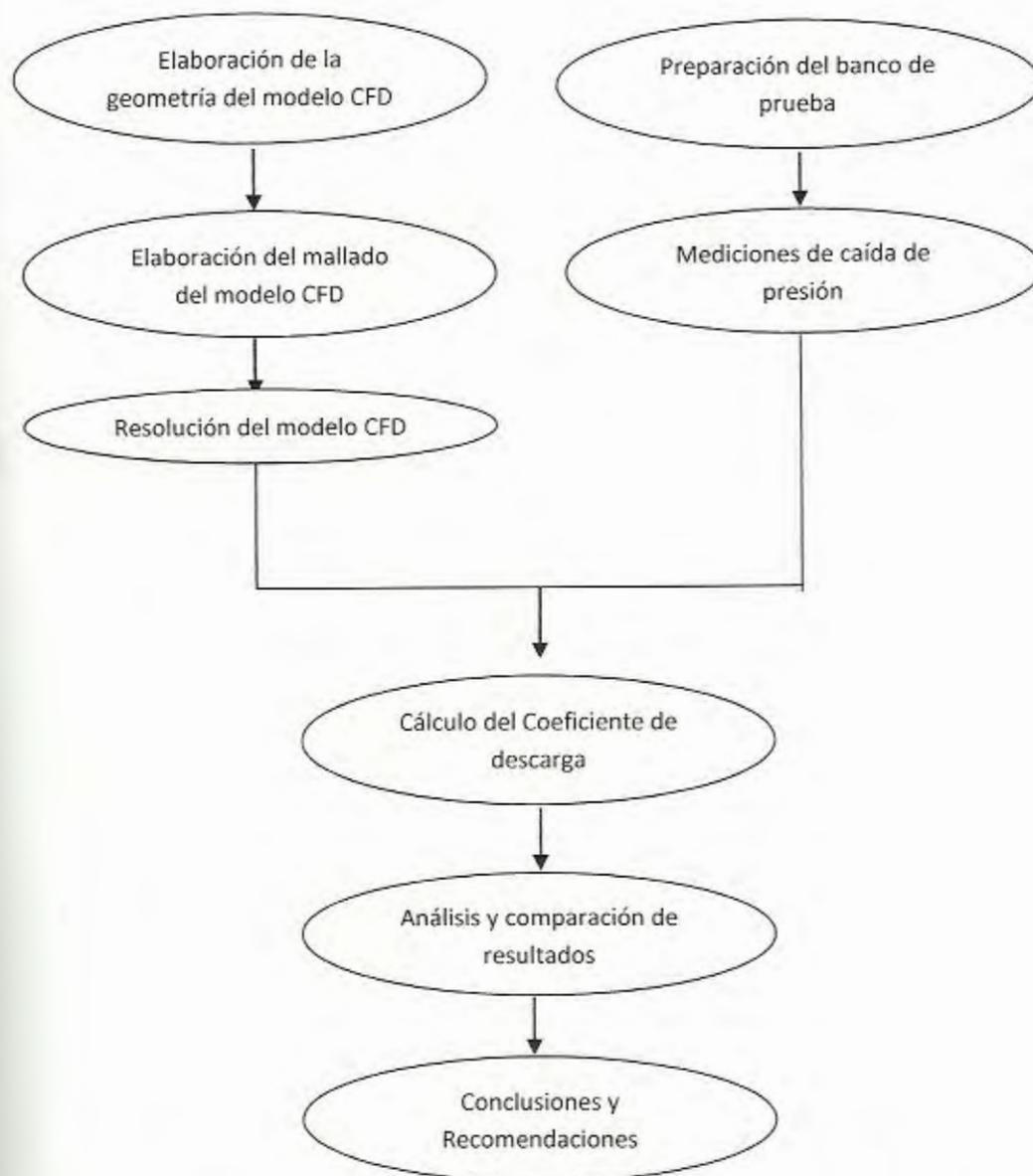


FIGURA 1.3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA TESIS

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.

Este capítulo consiste en explicar detalladamente la teoría que será aplicada durante el desarrollo de la presente tesis. El cual comprende desde la teoría básica de la mecánica de fluidos hasta la teoría de la mecánica de fluidos computacional (CFD).

2.1 Fundamentos de Mecánica de Fluidos.

La teoría de la mecánica de fluidos es muy extensa debido a su gran campo de aplicación y estudio; por esta razón se ha creído conveniente incluir conceptos básicos de la mecánica de fluidos.

2.1.1 Fluido

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.

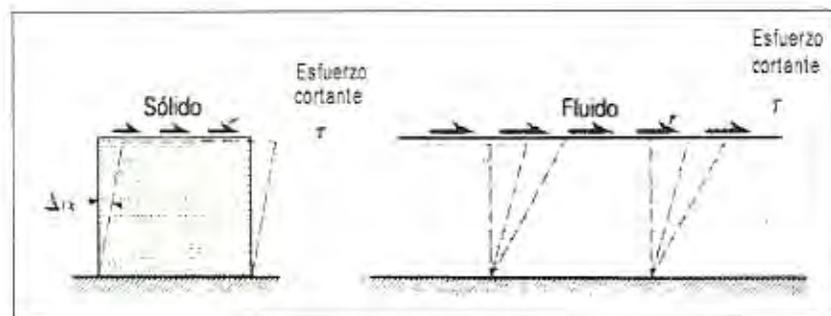


FIGURA 2.1 ESFUERZO CORTANTE EN UN SÓLIDO Y EN UN LIQUIDO²

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.

² Mecánica de Fluidos Irving H. Shames, page 3

2.1.2 Caudal

Caudal o flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo; si el área es constante y el flujo es completamente desarrollado la fórmula del caudal es:

$$Q = v \cdot A \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde;

A= área de la sección por la que circula el fluido (m^2) o (ft^2)

v= Velocidad promedio del fluido (m/s) o (ft/s)

2.1.3 Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de energía depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Este comportamiento del fluido dentro de un ducto circular depende de cuatro variables: la densidad del fluido ρ , su viscosidad dinámica μ , el diámetro del tubo D Y la velocidad promedio del flujo v .

La relación que existe entre estas cuatro variables producen un número adimensional conocido como número de Reynolds, independiente del sistema de unidades de las variables mencionadas.

La ecuación siguiente muestra la definición básica del número de Reynolds:

$$Re = \frac{u \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Estas dos ecuaciones son equivalentes debido a que la viscosidad cinemática es igual a $\nu = \mu/\rho$.

TABLA 1
UNIDADES ESTÁNDAR PARA LAS VARIABLES UTILIZADAS
EN EL CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS

Variable	Unidades del SI	Unidades del Sistema Ingles
Velocidad promedio	m/s	ft/s
Diámetro	m	ft
Densidad	Kg/m ³	slugs/ft ³
Viscosidad cinemática	N.s/m ² o Kg/m.s	slugs/ ft*s
Viscosidad dinámica	m ² /s	ft ² /s

2.1.4 Tipos de flujos

Flujo es la cantidad de fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo, puede expresarse por medio de tres términos distintos:

Q: El flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

W: El flujo en peso es el peso del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

M: El flujo másico es la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

Para este estudio, solo se analiza los flujos volumétricos en diferentes medidores de flujos. Estos flujos se clasifican de acuerdo a su número de Reynolds en flujo laminar y flujo turbulento.

2.1.4.1 Flujo Laminar

El flujo laminar se lo define como un patrón bien ordenado donde se supone que las capas de fluido se deslizan una sobre otra. Para flujos internos específicamente en tuberías, se define que un flujo es laminar cuando su número de Reynolds es menor a 2000.

2.1.4.2 Flujo turbulento

El flujo turbulento se lo define cuando las capas del fluido se desplazan de una forma desordenada. Para flujos internos específicamente en tuberías, se define que un flujo es turbulento cuando su número de Reynolds es mayor a 4000.

2.1.5 Caída de Presión

La caída de presión o gradiente de presión en un fluido en movimiento; es una fuerza de superficie que actúa sobre las caras de una partícula debida a los esfuerzos viscosos.

2.1.6 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.

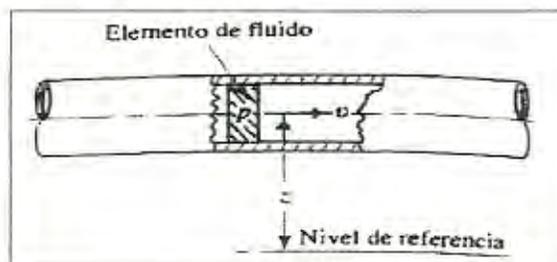


FIGURA 2.2 ELEMENTO DE FLUIDO EN UNA TUBERÍA³

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 como el que se ilustra en la figura 2.2 dentro de una tubería en un sistema de flujo. Se localiza a cierta elevación Z ,

³ Mecánica de Fluidos, Robert L.Mott, pág. 166

tiene velocidad promedio v 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;

$$E_p = W.Z \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde W es el peso del elemento.

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

$$E_c = W \cdot u^2 / 2.g \quad \text{Ec. 2.4}$$

- ✓ 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;

$$E_f = W.P/\gamma_p \quad \text{Ec. 2.5}$$

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

$$E = E_f + E_p + E_c$$

$$E = W.P/\gamma_p + W.Z + W \cdot u^2 / 2.g \quad \text{Ec. 2.6}$$

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

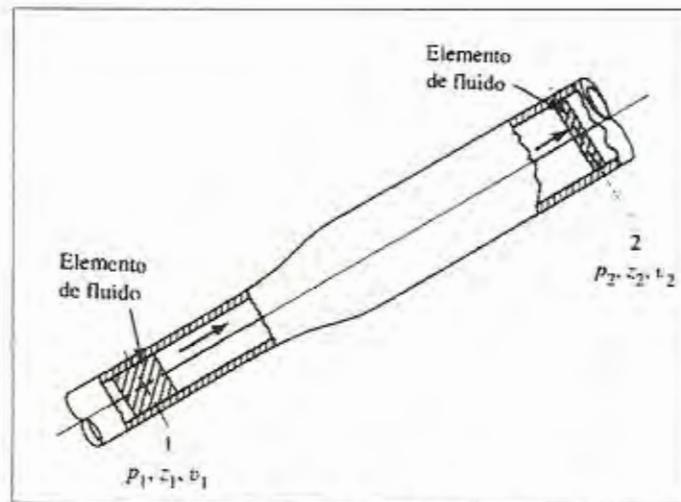


FIGURA 2.3 ELEMENTOS DE FLUIDOS UTILIZADOS EN LA ECUACIÓN DE BERNOULLI ⁴

Ahora, considere el elemento de fluido en la figura 2.3, que se mueve de la sección 1 a la 2. Los valores de P , Z y v son diferentes en las dos secciones. En la sección 1, la energía total es;

$$E_1 = \frac{WP_1}{\gamma_p} + WZ_1 + \frac{Wu_1^2}{2g}$$

En la sección 2, la energía total es;

$$E_2 = \frac{WP_2}{\gamma_p} + WZ_2 + \frac{Wu_2^2}{2g}$$

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;

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{WP_1}{\gamma_p} + WZ_1 + \frac{Wu_1^2}{2g} = \frac{WP_2}{\gamma_p} + WZ_2 + \frac{Wu_2^2}{2g}$$

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

$$\frac{P_1}{\gamma_p} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_p} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad \text{Ec.2.7}$$

Conocida como la ecuación de Bernoulli.

2.1.7 Coeficiente de Descarga

El Coeficiente de descarga C_d representa la relación entre la velocidad real del flujo a través de un medidor de flujo y la velocidad ideal del flujo para un medidor de flujo sin ninguna pérdida de energía. Por tanto el valor C_d siempre será menor que 1. Su relación algebraica para cualquier tipo de medidor de flujo es;

$$C_d = \frac{Q_r}{Q_t} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde; Q_r es el caudal real del flujo y Q_t es el caudal teórico del flujo que es obtenido mediante la ecuación de Bernoulli.

2.1.8 Ecuaciones Fundamentales de la Mecánica de Fluidos en Forma Diferencial

El CFD está basado en las ecuaciones fundamentales que gobiernan la dinámica de fluidos, las cuales se derivan de los tres principios físicos que toda la dinámica de fluidos se basa:

- ✓ Conservación de masa
- ✓ Conservación de la cantidad de movimiento
- ✓ Conservación de la energía

Las ecuaciones fundamentales pueden adoptar varias formas. Para la generalidad de los análisis teóricos esto no es mayormente relevante, pero sí lo es para el análisis CFD; ya que para algún específico algoritmo de solución no todas las formas de las ecuaciones se comportan igual en lo referente a la convergencia de la solución.

Para obtener las ecuaciones básicas del movimiento de un fluido, se debe seguir siempre el siguiente procedimiento:

1. Escoja el principio físico fundamental.
2. Aplique el principio físico al modelo del flujo adecuado.
3. Obtenga la ecuación matemática correspondiente.

El modelo de flujo adecuado para el análisis CFD es el *elemento infinitesimal fijo* de un volumen de control que se encuentra dentro del fluido, el cual posee las características de que el fluido se mueve a través de él y los principios físicos se aplican al elemento ∂V (diferencial del volumen o volumen infinitesimal).

Para este modelo se obtienen ecuaciones diferenciales parciales en la forma conservativa. Todas estas ecuaciones parten del mismo modelo del flujo, el cual es el elemento infinitesimal fijo; obteniendo de esta manera las siguientes ecuaciones fundamentales después de simplificarlos a su máxima expresión, mediante el uso de matemática avanzada.

2.1.8.1 Ecuación diferencial de conservación de la masa

Al realizar una sumatoria de flujos de masa que entran y salen de un elemento infinitesimal fijo (figura 2.4), se obtiene:

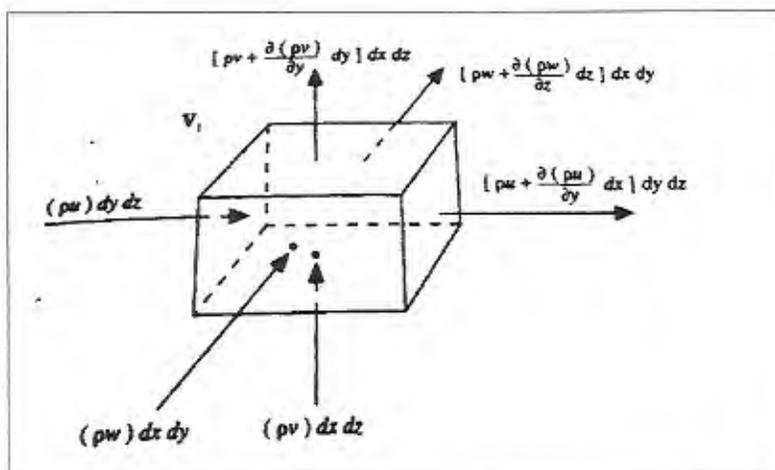


FIGURA 2.4 FLUJOS DE MASA EN UN ELEMENTO INFINITESIMAL FIJO⁵

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \left[\frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} \right] = 0 \quad \text{Ec. 2.9}$$

Esta es la ecuación diferencial de la conservación de masa o continuidad en forma conservativa.

Donde;

u= Velocidad del elemento en la dirección x.

v= Velocidad del elemento en la dirección y.

w= Velocidad del elemento en la dirección z.

⁵ Computational Fluid Dynamics, John D. Anderson, pág. 55

2.1.8.2 Ecuación diferencial de cantidad de movimiento

Ahora se realiza un análisis diferencial de las fuerzas que actúan sobre una partícula infinitesimal, para obtener de esta manera las ecuaciones fundamentales del segundo principio físico que está basado la dinámica de fluidos.

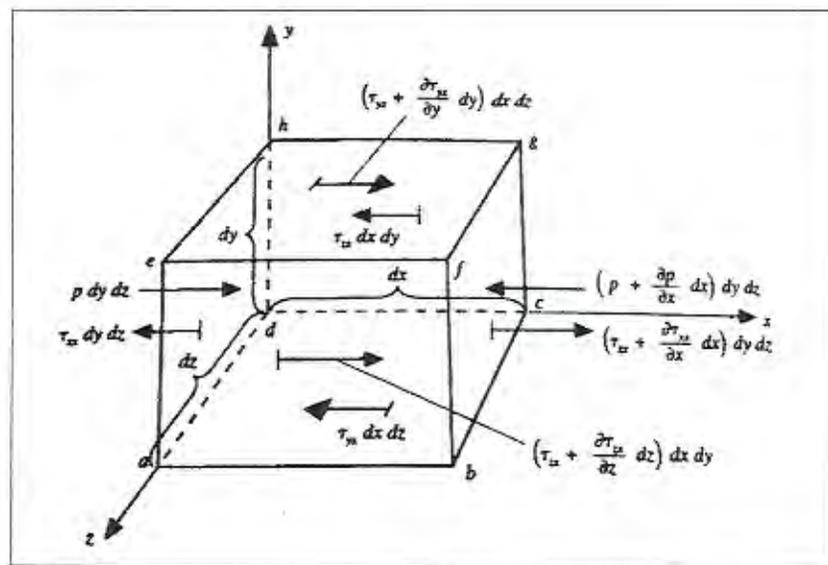


FIGURA 2.5 FUERZAS QUE INTERACTÚAN SOBRE UN ELEMENTO INFINITESIMAL FIJO EN LA DIRECCIÓN X⁶

Omitiendo y simplificando a su máxima expresión se obtiene:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(\rho u)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u^2)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho uv)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho uw)}{\delta z} \\ & = -\frac{\delta P}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v} + 2\mu \frac{\delta u}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left[\mu \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[\mu \left(\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right) \right] + \rho f_x \quad \text{Ec. 2.10} \end{aligned}$$

⁶ Computational Fluid Dynamics, John D. Anderson, pág. 61

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(\rho v)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho uv)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v^2)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho vw)}{\delta z} \\ &= -\frac{\delta P}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta x} \left[\mu \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\delta v}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left[\mu \left(\frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \right) \right] + \rho f_y \quad \text{Ec. 2.11} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(\rho w)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho uw)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho vw)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w^2)}{\delta z} \\ &= -\frac{\delta P}{\delta z} + \frac{\delta}{\delta x} \left[\mu \left(\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[\mu \left(\frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\delta w}{\delta z} \right) + \rho f_z \quad \text{Ec. 2.12} \end{aligned}$$

Donde;

$$\nabla \equiv \mathbf{i} \frac{\delta}{\delta x} + \mathbf{j} \frac{\delta}{\delta y} + \mathbf{k} \frac{\delta}{\delta z}$$

$V = (u, v, w)$; Vector velocidad total

$\lambda =$ Segundo coeficiente de viscosidad, el cual Stokes realizó la hipótesis que era igual a:

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad \text{Ec. 2.13}$$

Dicha hipótesis no ha sido confirmada hasta el presente día.

$f_x =$ Fuerzas de cuerpo actuando sobre la partícula en la dirección x.

$f_y =$ Fuerzas de cuerpo actuando sobre la partícula en la dirección y.

$f_z =$ Fuerzas de cuerpo actuando sobre la partícula en la dirección z.

Las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12 representan las ecuaciones de Navier-Stokes en forma conservativa.

2.1.8.3 Ecuación diferencial de la energía

En esta sección se realiza un análisis diferencial de las energías que actúan sobre una partícula infinitesimal, para obtener de esta manera las ecuaciones fundamentales del tercer principio físico que está basado la dinámica de fluidos.

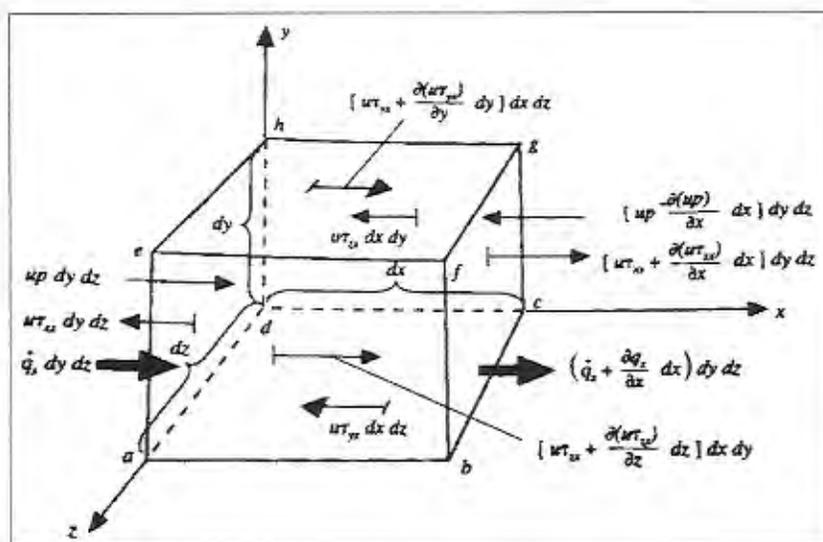


FIGURA 2.6 ENERGÍAS QUE INTERACTÚAN CON EL ELEMENTO INFINITESIMAL EN LA DIRECCIÓN X.⁷

Omitiendo y simplificando a su máxima expresión se obtiene:

⁷ Computational Fluid Dynamics, John D. Anderson, pág. 68

$$\begin{aligned}
& \frac{\delta(\rho e)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho e V) \\
&= \rho \dot{q} + \frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) - P \left(\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \right) \\
&+ \lambda \left(\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \right)^2 \\
&+ \mu \left[2 \left(\frac{\delta u}{\delta x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta v}{\delta y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta w}{\delta z} \right)^2 \right. \\
&\left. + \left(\frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \right)^2 \right] \quad \text{Ec. 2.14}
\end{aligned}$$

Donde;

e = energía interna del elemento infinitesimal

T = temperatura del elemento infinitesimal.

K = Constante térmica de conductividad del elemento infinitesimal.

La ecuación 2.14 representa la ecuación de la *Energía en forma conservativa de un elemento infinitesimal* escrita en términos de la energía interna.

2.2 Medidores de Flujo

Casi todos los problemas prácticos con fluidos en ingeniería están relacionados con una medida precisa del flujo. Hay necesidad de medir propiedades locales (velocidad, presión, temperatura, densidad, viscosidad, nivel de turbulencia), integradas (flujo másico y flujo volumétrico) y globales (visualización de todo el campo

fluido). Para ello en esta sección se explicará los diferentes medidores de flujo volumétrico.

2.2.1 Tipos de Medidores de Flujo

Existen una gran variedad de medidores de flujo entre los cuales se tiene: disco giratorio, medidor de turbina, medidores de carga variable, rotámetro y etc... Pero en esta sección se explica brevemente sobre los medidores de carga variable; cuyo principio fundamental es el siguiente: Cuando se restringe una corriente de fluido, su presión disminuye en una cantidad que depende del flujo volumétrico a través de la restricción. Por tanto, la diferencia de presión entre puntos antes y después de la restricción se utiliza para indicar el flujo volumétrico. Los tipos más comunes de medidores de carga variable son el tubo Venturi y placa orificio.

2.2.1.1 Venturi

En la figura 2.7 se muestra el aspecto básico del tubo Venturi. El flujo que viene de la tubería principal de la sección 1 se hace acelerar a través de una sección estrecha denominada *garganta*, donde la presión del fluido disminuye. Después, el flujo se expande a través de una porción divergente que alcanza el mismo diámetro de la tubería principal. Se coloca tomas de presión en la pared del

tubo de la sección 1 y en la pared de la garganta, a la que SE llamará sección 2. Estas tomas de presión se conectan a ambos lados de un manómetro diferencial, de modo que la deflexión h sea una indicación de la diferencia de presión $P_1 - P_2$. El coeficiente de descarga es casi la unidad y las pérdidas no recuperables son muy pequeñas

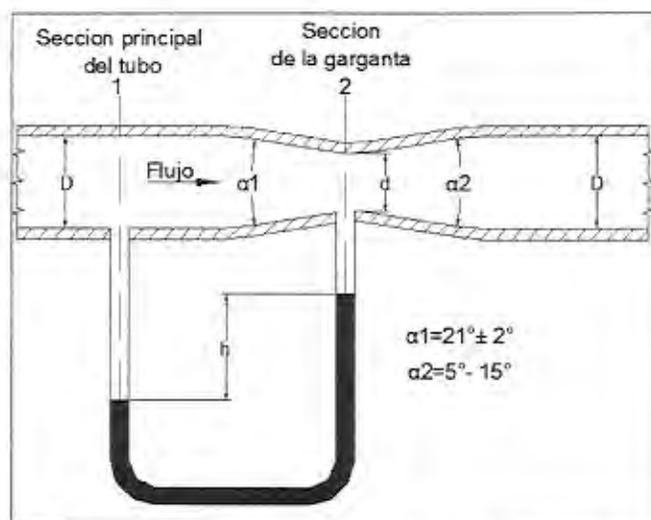


FIGURA 2.7 MEDIDOR DE FLUJO- TUBO VENTURI⁸

2.2.1.2 Placa orificio

Una placa plana con un agujero de bordes afilados y un maquinado con precisión, recibe el nombre de orificio. Cuando se coloca en forma concéntrica dentro de un tubo, según se ilustra en la figura 2.8, hace que el flujo se contraiga de modo repentino conforme se

acerca al orificio, y después que se expanda al regresar a todo el diámetro del tubo. La corriente que pasa a través del orificio forma una vena contracta y la velocidad rápida del flujo origina una disminución de la presión corriente abajo del orificio. Tomas de presión que está antes y después del orificio (secciones 1 y 2), permiten la medición de la presión diferencial a través del instrumento. Estos dispositivos, suele tener una β entre 0.2 y 0.8, aunque el diámetro d no debe ser menor de 12.5mm.

Donde;

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 2.15}$$

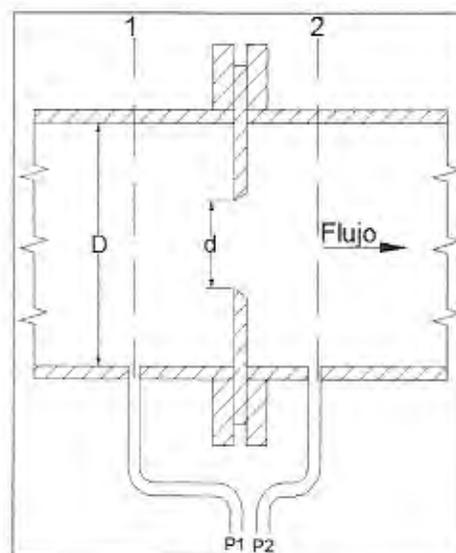


FIGURA 2.8 MEDIDOR DE FLUJO – PLACA ORIFICIO⁹

2.2.1.3 Determinación del Coeficiente de Descarga

Para determinar el coeficiente de descarga, se emplea la ecuación de la energía (Ec. 2.7) y la continuidad. Con el empleo de las secciones 1 y 2 como puntos de referencia de la figura 2.7, se escribe las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g}$$

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2 \quad \text{Ec.2.16}$$

Estas ecuaciones sólo son válidas para fluidos incompresibles, es decir, líquidos. Por esta razón, la Ec. 2.7 puede simplificarse algebraicamente en:

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_l$$

$$u_2^2 - u_1^2 = 2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_l \right]$$

Pero $u_2^2 = u_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2$. Entonces, tiene:

$$u_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right] = 2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_l \right]$$

$$u_1 = \sqrt{\frac{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_l \right]}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

A continuación se prosigue a realizar dos simplificaciones. En primer lugar, es común que el tubo Venturi se instale en posición horizontal, por lo que la diferencia de elevación $Z_1 - Z_2$ es igual a cero. En segundo lugar, el término h_f es la pérdida de energía del fluido conforme pasa de la sección 1 a la 2. El valor de h_f debe determinarse en forma experimental. Pero es más conveniente modificar la Ec. 2.17 eliminando h_f e introduciendo un coeficiente de descarga C_d :

$$u_1 = C_d \sqrt{\frac{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right]}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \quad \text{Ec. 2.18}$$

La Ec. 2.18 se emplea para obtener la velocidad de flujo, pero se desea calcular el flujo volumétrico, entonces sabiendo que $Q_r = A_1 u_1$, se tiene:

$$Q_r = C_d A_1 \sqrt{\frac{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right]}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \quad \text{Ec. 2.19}$$

El coeficiente de descarga C_d representa la relación de la velocidad real de energía a través del medidor de flujo, respecto a la velocidad ideal para un medidor de flujo sin ninguna pérdida de energía.

Por lo tanto, despejando el C_d , se obtiene:

$$C_d = \frac{Q_r}{A_1 \sqrt{\frac{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right]}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}}} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde;

Q_r : Representa al caudal real obtenido experimentalmente

Generalizado para cualquier medidor de flujo de carga variable y conociendo que $Q_r = A_1 V_r$ se tiene:

$$C_d = \frac{u_r}{\sqrt{\frac{2 \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right]}{\frac{1}{\beta^4} - 1}}} \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde;

u_r : Velocidad real del fluido obtenido experimentalmente.

La expresión final de la Ec. 2.21 en función del Número de Reynolds (Re), tiene;

$$C_d = \frac{Re v}{D \sqrt{\frac{2 \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right]}{\frac{1}{\beta^4} - 1}}} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Donde;

Re: Número de Reynolds real del fluido obtenido experimentalmente.

v: Viscosidad cinemática del fluido

2.2.2 Aplicaciones

Existen una gran variedad de aplicaciones de los medidores de flujo en la industria, esto es debido a que en cualquier tipo de proceso se requiere la medición del flujo de cualquiera de sus elementos que la conforman. A continuación se menciona algunos ejemplos específicos donde es indispensable la medición del flujo.

- ✓ *Evaluación del rendimiento.* Un motor requiere el combustible que lo provea de la energía básica necesaria para operar. Para saber el rendimiento de la maquina es necesario medir la salida de potencia (energía por unidad de tiempo), en relación con el flujo volumétrico de combustible utilizado por la maquina

(galones por hora). Esto se relaciona en forma directa con la medición de la eficiencia del carro, en millas por galón o kilómetros por litro, que es común hacer.

- ✓ *Control de procesos.* Cualquier industria que utilice fluidos en sus procesos, debe vigilar el flujo másico de los fluidos claves. Por ejemplo, las bebidas son mezclas de varios constituyentes que debe controlarse con precisión para mantener el sabor que espera el consumidor. La vigilancia continua y el control de flujo volumétrico de cada constituyente en el sistema de mezclado tienen importancia crucial para producir un producto de calidad consistente.

- ✓ *Investigación y desarrollo.* Los ejemplos son numerosos. Considere la transición de los refrigerantes fluorocarbonados (freones) a otros más aceptables en cuanto al cuidado del ambiente. Es esencial probar muchas fórmulas candidatas para determinar el efecto enfriador que producen, como función del flujo másico del refrigerante a través de acondicionador de aire o congelador.

2.3 Fundamentos de dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD) consiste en el análisis del movimiento de los fluidos mediante simulaciones computacionales. Su 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 pequeños elementos y resolviendo allí dichas ecuaciones.

Los métodos numéricos aplicados a la mecánica de fluidos resultan una herramienta muy útil para el diseño y análisis de las distintas situaciones prácticas en las que se utilizan los fluidos.

En esta sección se explica los fundamentos de la dinámica de fluidos computacional (CFD), para que sea entendible como el ordenador procesa los resultados que se obtiene del software ANSYS-CFX 14.5.

2.3.1 Antecedente del CFD

Hasta finales de los años 60 los ordenadores no alcanzaba velocidades de cálculo suficientes como para resolver casos sencillos. Hasta entonces, las técnicas experimentales constituían prácticamente la única herramienta de análisis y diseño de cualquier problema de mecánica de fluidos.

En la actualidad, los ensayos siguen siendo de suma importancia para la comprobación de diseños complejos realizados mediante la mecánica de fluido computacional, pero los continuos avances en la capacidad de los ordenadores y en los algoritmos permiten una reducción importante en el número de ensayos necesarios.

A lo largo de las últimas dos décadas, las técnicas CFD han evolucionado, mejorando los programas comerciales e introduciéndose en las distintas áreas de la ingeniería, entre las aplicaciones más importantes en que se emplean las técnicas numéricas, se tienen:

- ✓ *Industria automovilística.* Las aplicaciones típicas son el estudio de la aerodinámica de vehículos, la climatización interior del vehículo, el enfriamiento del bloque del motor y flujo del combustible en las válvulas de distribución.
- ✓ *Industria electrónica.* Las aplicaciones en este campo son diversas, entre los más estudiados son el flujo y distribución de temperaturas en las carcasas electrónicas, el enfriamiento de distintos componentes y el flujo de aire en las unidades de discos.

- ✓ *Industria de proceso y químicas.* Problemas comunes resueltos con técnicas CFD son el flujo de plásticos, los estudios en conducción de lodos, el llenado de moldes, estudios en procesos de combustión y los flujos reactivos complejos (con intercambio de calor, masa y reacciones químicas).
- ✓ *Industria nuclear.* Algunos estudios relacionados con el flujo en conductos de sustancias originadas en los procesos de reacción nuclear, el enfriamiento del reactor, estudios relacionados con el intercambiador de calor, el flujo en el interior del reactor, el almacenamiento de residuos nucleares, el diseño de torres de enfriamiento y las investigaciones sobre chorros térmicos.

Las áreas de ingeniería donde se aplican las técnicas CFD son innumerables, pero se citaron las áreas donde su aplicación es mucho más indispensable. Las ventajas que proporciona el análisis con técnicas CFD se pueden resumir en las siguientes:

- ✓ Reducción sustancial de tiempos y de costos en los nuevos diseños.
- ✓ Posibilidad de analizar sistemas y condiciones complejas, que son muy difícil de simular experimentalmente.

- ✓ Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límite de funcionamiento.

Uno de los mayores inconvenientes de las técnicas CFD consiste en que siempre está la posibilidad de cometer graves errores en cuestiones básicas por parte del personal que fue calificado para el manejo del programa. Estos errores generalmente proviene de:

- ✓ Simplificación del fenómeno a estudiar para que el hardware y software sean capaces de abordarlo. El resultado será más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y las simplificaciones realizadas.
- ✓ Falta de modelos para simular el efecto de la turbulencia, los flujos multifásicos o la combustión, entre otros.
- ✓ Falta de criterio y conocimiento por parte del personal para la interpretación de datos.

2.3.2 Las matemáticas de la técnica CFD

Las matemáticas de la técnica CFD son ecuaciones de derivadas parciales cuasi-lineales de primer o segundo orden, que representan a los modelos matemáticos de los fenómenos físicos.

Para la clasificación de las Ecuaciones diferenciales lineales cuasi-lineales, se considera el sistema EDP en 2 dimensiones:

$$a_1 \frac{\delta u}{\delta x} + b_1 \frac{\delta u}{\delta y} + c_1 \frac{\delta v}{\delta x} + d_1 \frac{\delta v}{\delta y} = f_1 \quad \text{Ec. 2.23a}$$

$$a_2 \frac{\delta u}{\delta x} + b_2 \frac{\delta u}{\delta y} + c_2 \frac{\delta v}{\delta x} + d_2 \frac{\delta v}{\delta y} = f_2 \quad \text{Ec. 2.23b}$$

Donde;

x, y : Variables independientes

u, v : Son variables dependientes $f(x, y)$.

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, f_1, f_2$: Coeficientes que pueden ser $f(x, y, u, v)$.

Se Puede plantear adicionalmente las siguientes ecuaciones:

$$\delta u = \frac{\delta u}{\delta x} \delta x + \frac{\delta u}{\delta y} \delta y \quad \text{Ec. 2.24a}$$

$$\delta v = \frac{\delta v}{\delta x} \delta x + \frac{\delta v}{\delta y} \delta y \quad \text{Ec. 2.24b}$$

En forma matricial se puede representar este sistema de ecuaciones diferenciales parciales en:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ \delta x & \delta y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta x & \delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u / \delta x \\ \delta u / \delta y \\ \delta v / \delta x \\ \delta v / \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \delta u \\ \delta v \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.25}$$

Resolviendo por la regla de Cramer para $\delta u / \delta x$; $\frac{\delta u}{\delta x} = \frac{\det B}{\det A} = \frac{|B|}{|A|}$

Donde;

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ \delta x & \delta y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta x & \delta y \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} f_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ f_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ \delta u & \delta y & 0 & 0 \\ \delta v & 0 & \delta x & \delta y \end{bmatrix}$$

El valor de $\delta u / \delta x$ (e igualmente el de las otras derivadas parciales) es independiente de cómo se forma $\delta x, \delta y$.

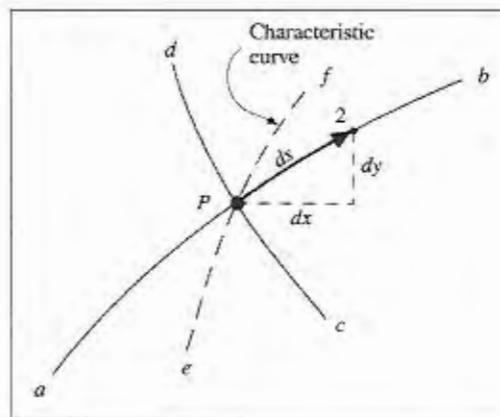


FIGURA 2.9 ILUSTRACIÓN DE CURVA CARACTERÍSTICA¹⁰

¹⁰ Computational Fluid Dynamics, John D. Anderson, pag. 97

Pueden haber excepciones para el caso de ciertas direcciones para el cual $\det A=0$. Por ejemplo la línea e-f. Por tanto $\bar{\delta}u/\bar{\delta}x$, $\bar{\delta}u/\bar{\delta}y$,... etc serán indeterminadas. En ese caso una curva como e-f (figura 2.9) se denomina curva característica a través del punto P. Estas curvas se las puede determinar a través de la condición $\det A=0$.

$$|A| = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ \bar{\delta}x & \bar{\delta}y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\delta}x & \bar{\delta}y \end{bmatrix} = 0$$

Expandiendo el determinante:

$$\begin{aligned} & (a_1c_2 - a_2c_1)(\bar{\delta}y)^2 - (a_1d_2 - a_2d_1 + b_1c_2 - b_2c_1)\bar{\delta}x\bar{\delta}y + (b_1d_2 - b_2d_1)(\bar{\delta}x)^2 \\ & = 0 \quad \text{Ec.2.26} \end{aligned}$$

Dividiendo para $(\bar{\delta}x)^2$

$$a \left(\frac{\bar{\delta}y}{\bar{\delta}x} \right)^2 - b \left(\frac{\bar{\delta}y}{\bar{\delta}x} \right) + c = 0 \quad \text{Ec. 2.27}$$

Definiendo;

$$a = a_1c_2 - a_2c_1$$

$$b = a_1d_2 - a_2d_1 + b_1c_2 - b_2c_1 \quad c = b_1d_2 - b_2d_1$$

Por definición entonces;

$$\frac{\bar{\delta}y}{\bar{\delta}x} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{Ec. 2.28}$$

La Ec. 2.28 define la dirección de las líneas características en el plano x,y . La naturaleza de estas difiere dependiendo del valor del discriminante:

$$D = b^2 - 4ac \quad \text{Ec. 2.29}$$

Los tipos de EDP se clasifican según el Valor de D .

1. Si $D > 0$, Existen 2 curvas características reales y diferentes existen a través de cada punto en el plano x,y . En este caso el sistema de EDP 2.24 es de tipo *HIPERBOLICO*.
2. Si $D=0$, Existe una curva característica solamente y el sistema EDP 2.24 es de tipo *PARABOLICO*.
3. Si $D < 0$, las curvas características son imaginarias y el sistema EDP 2.24 es de tipo *ELIPTICO*.

Por lo general lo que define el tipo de EDP al que pertenece la ecuación fundamental, son sus condiciones iniciales y las condiciones de frontera o contorno del fluido a analizar, es por esta razón la importancia de seleccionar correctamente las condiciones iniciales y de contorno, ya que pueden producir soluciones erróneas.

2.3.3 Metodología del CFD

La metodología del CFD por lo general varía según el software a utilizar, para el desarrollo de la presente tesis se usará el ANSYS-CFX 14.5, en el cual la realización de una simulación en CFX se divide en cuatro etapas.

- ✓ Creación de la geometría/Malla.
- ✓ Definición de la física del modelo
- ✓ Solución del problema en CFD.
- ✓ Visualización de los resultados en el Post-procesador.

2.3.3.1 Geometría/Mallado

ANSYS-CFX 14.5 posee una fase destinada para la creación de la geometría y la malla. Los pasos básicos a realizar para generar la geometría y posteriormente la malla, implican:

- ✓ Definición de la geometría de la región de interés.
- ✓ Creación de regiones de flujo fluido, regiones sólidas y nombres divisorios superficiales.
- ✓ Ajuste de propiedades para la malla (Número de nodos, número de elementos, mallas refinadas en capas límites, etc.).

En CFX, la geometría puede ser importada desde la mayoría de programas destinados a la realización de ellos y la malla de volúmenes de control es generada automáticamente.

2.3.3.2 Definición Física

La segunda etapa de proceso previo implica la definición de las condiciones de contorno del problema para su resolución. Los archivos de malla son cargados en el pre-procesador de física, CFX-Pre.

En esta sección los modelos físicos que deben ser incluidos en la simulación son seleccionados, así como las propiedades de los fluidos.

2.3.3.3 Solucionador (Solver)

Un problema en CFD se resuelve de la siguiente forma:

- ✓ Las ecuaciones diferenciales parciales son integradas en todos los volúmenes de control en la región en interés.
- ✓ Estas ecuaciones integrales son convertidas a un sistema de ecuaciones algebraicas generando un juego de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.
- ✓ Dichas ecuaciones algebraicas se resuelven de forma iterativa.

Se considera que se ha llegado a la solución cuando se cumplen los criterios de convergencia que pueden ser seleccionados según sea necesario. La exactitud de la solución final depende de varios factores como son: el tamaño y forma del volumen de control, los valores residuales obtenidos y la adecuación de los modelos físicos al problema. Los procesos físicos complejos, como combustión y turbulencia, a menudo son modelados utilizando reacciones empíricas. Las aproximaciones inherentes en estos modelos también contribuyen a diferencias entre la solución CFD y el flujo real.

2.3.3.4 Post-procesador

El post-procesador es el componente de programas que permite analizar, visualizar y representar los resultados. El post-procesador permite:

- ✓ Visualización de la geometría y volúmenes de control.
- ✓ Mostrar la dirección y la magnitud del flujo.
- ✓ Visualización de la variación de variables escalares.
- ✓ Permite realizar cálculos numéricos cuantitativos
- ✓ Realizar animaciones
- ✓ Representar las características físicas mediante planos o volúmenes.

2.3.4 Discretización Numérica de las Ecuaciones Gobernantes por el Método de Volúmenes Finitos.

El método de los volúmenes finitos (FVM- Finite Volume Method) es una técnica numérica utilizada para resolver las ecuaciones diferenciales parciales que explican el comportamiento de los fluidos, es decir las ecuaciones de transporte y conservación de las cantidades de masa, momento y energía así como cualquier otra ecuación de balance transportando una variable.

El FVM divide el dominio en subdominios llamados celdas o volúmenes de control (VC), los cuales tienen un dominio Ω y un contorno Γ asociados. Además, dentro de cada VC existen nodos específicamente ubicados, donde las distintas variables son evaluadas. La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre con otros métodos de discretización. Este método puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas; por este motivo, el método de los volúmenes finitos es el empleado para la resolución del flujo en la presente tesis.

2.3.5 Modelos de Turbulencia

La turbulencia consiste en fluctuaciones en el campo de flujo en tiempo y espacio. Es un proceso complejo, principalmente porque es tridimensional, inestable y consiste en muchas escalas. Este puede tener un efecto significativo en las características del flujo. La turbulencia ocurre cuando las fuerzas de inercia en el fluido llegan a ser significativas comparadas con las fuerzas viscosas, y se caracteriza por un alto número de Reynolds.

Dentro de los abordajes usuales para simular procesos turbulentos destacan los métodos de simulación numérica directa (DNS), de simulación de grandes vórtices (LES) y los basados en promediar temporalmente las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS). La última de estas técnicas es la que demanda un menor costo computacional, y al mismo tiempo ha demostrado buenos resultados cuando se emplea para resolver problemas tecnológicos reales, con geometrías y condiciones de contorno complejas.

Los modelos de turbulencia RANS son el resultado de promediar las ecuaciones de Navier-Stokes, ya sea en realizaciones o en el tiempo. Al realizar dichos promedios surge el tensor de esfuerzos de Reynolds el cual debe ser modelado para obtener un sistema

cerrado de ecuaciones. Los diferentes modelos utilizan suposiciones y por supuesto ecuaciones diferentes dependiendo de los efectos que se quieran capturar. Comúnmente estos modelos se clasifican según el número de ecuaciones de transporte adicionales que se utilizan para calcular la viscosidad turbulenta. Entre las principales tiene:

- ✓ Modelo Spalart-Allmaras (1 ecuación).
- ✓ Modelo Estándar $k - \varepsilon$ (2 ecuaciones).
- ✓ Modelo SST $k - \omega$ (2 ecuaciones).
- ✓ Modelo de Transición $k - k_l - \omega$ (3 ecuaciones).
- ✓ Modelo SST de Transición (4 ecuaciones).

El modelo a utilizar es Estándar $k - \varepsilon$, por lo que se realiza una descripción respectiva de este modelo.

El modelo $k - \varepsilon$ se compone de dos ecuaciones diferenciales, una para el transporte de la energía cinética turbulenta k y otra para el transporte de la tasa de disipación turbulenta ε . En este modelo la viscosidad turbulenta es relacionada con k y ε mediante la siguiente expresión:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 2.30}$$

Donde C_μ es un coeficiente empírico igual 0.09. Los valores locales para k y ε son obtenidos al resolver sus ecuaciones de transporte:

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho \bar{V}_i k)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\delta k}{\delta x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad \text{Ec. 2.31}$$

$$\frac{\delta(\rho \varepsilon)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho \bar{V}_i \varepsilon)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad \text{Ec. 2.32}$$

En las ecuaciones 2.31 y 2.32 el primer y segundo término del lado izquierdo representa la variación temporal y la componente convectiva para k y para ε . En tanto que, los términos de la parte derecha cuantifican los fenómenos difusivos, y la producción y la disipación turbulentas. C_1 , C_2 son constantes empíricas que toman valores de 1.44 y 1.92, respectivamente. σ_k y σ_ε son constantes conocidas como números de Prandtl turbulentos, y para el modelo $k - \varepsilon$ toman los valores de 1.0 y 1.3, respectivamente. El término de producción G se estima como proporcional al gradiente de las velocidades promediadas y a la viscosidad turbulenta, de la siguiente manera:

$$G = \frac{1}{2} \mu_t (\nabla \bar{V} + (\nabla \bar{V})^T)^2 \quad \text{Ec. 2.33}$$

El modelo $k - \varepsilon$ ha sido desarrollado para flujos completamente turbulentos. Esto trae problemas en zonas cercanas a las paredes

del dominio. En dichas zonas, la turbulencia es “amortiguada”, en tanto que al alejarse de la pared el gradiente de la velocidad promedio $\nabla \bar{V}$ resulta significativo, y con ello la generación de turbulencia.

Debido a que el CFD promedia las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) surge el tensor de esfuerzo de Reynolds el cual debe ser modelado para obtener un sistema cerrado de ecuaciones, el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ muestra de una mejor manera el efecto turbulento del fluido; proporcionando 2 ecuaciones adicionales para el cálculo de la viscosidad turbulenta. Este modelo se enfoca en los mecanismos que afectan a la energía cinética turbulenta y asume que la viscosidad turbulenta es isotrópica, por esta razón es el modelo adecuado para este estudio.

2.3.6 Algoritmos de Solución

Los algoritmos CFD son una herramienta muy utilizada dentro del mundo industrial, debido a que simplifican el tiempo de la simulación. Este tipo de métodos tratan problemas físicos de dinámica de fluidos mediante una aproximación discreta, lo que permite resolver numéricamente problemas cuya solución analítica

es desconocida (como las ecuaciones de Euler o las de Navier-Stokes).

En la sección 2.3.5 se demostró que los modelos de turbulencia se expresan mediante ecuaciones diferenciales parciales y constituyen la descripción matemática del fenómeno físico. Mediante algoritmos de solución, se resuelve las variables de flujo (velocidad, temperatura, presión, densidad). Los algoritmos deben poseer ciertas características deseables como: eficiencia, confiabilidad, rápida convergencia y tendencia a no oscilar.

Los algoritmos de solución están estrechamente ligados al método de discretización usado. En CFD el método más comúnmente usado es, el de Volúmenes Finitos (FVM). En la tabla 2 se muestra los métodos numéricos empleados para resolver sistemas de ecuaciones lineales que surgen luego de la discretización:

TABLA 2
MÉTODOS NUMÉRICOS PARA RESOLVER SISTEMAS DE
ECUACIONES LINEALES

Método	Ejemplos
Directo	Eliminación Gausiana Descomposición LU Matriz Tri-Diagonal
Indirecto o Iterativo	Gauss-Seidel Jacobi Gradiente Conjugada
Factorización Matricial	Incompleta LU (ILU) Incompleta Cholesky
Multimalla	Geométrico Algebraico (AMG)

2.4 Software CFD

Para el análisis CFD se utiliza el software ANSYS el cual posee a su vez varios programas de simulación para las distintas áreas ingenieriles como: civil, eléctrica, mecánica estructural, mecánica de fluidos y etc... Para el área ingenieril de mecánica de fluidos posee dos programas muy importantes, el cuales son CFX Y FLUENT. Para este estudio se utiliza el CFX.

El software ANSYS CFX 14.5 es un programa de dinámica de fluidos de alto rendimiento que se ha aplicado para resolver distintos problemas de flujos de fluidos por más de 20 años. Su principal ventaja es que posee un solucionador avanzado, la clave para lograr soluciones fiables y precisas de forma rápida.

El software ANSYS-CFX 14.5 posee varias características, pero entre las más importantes tiene:

- ✓ Mallas fijas o móviles (trasladantes o rotacionales).
- ✓ Flujo Sub-sónico, Tran-sónico e hiper-sónico.
- ✓ Reacciones químicas (Combustión).
- ✓ Multi-fase (combinaciones sólido + líquido + gas).
- ✓ Cambio de fase (Evaporación, Condensación, solidificación).
- ✓ Superficies libres (Canales abiertos).
- ✓ Flujo compresible e incompresible.
- ✓ Transferencia de calor: conducción, convección y radiación.
- ✓ Flujo de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos.
- ✓ Flujos estables e inestables.
- ✓ Flujo laminar y turbulento.
- ✓ Librerías de propiedades de fluidos.
- ✓ Post-procesamiento como: iso-superficies, mapas de contornos, líneas de flujo, trayectoria de partículas y animaciones.

En secciones anteriores se explicó aspectos teóricos que embarcan los distintos puntos del procesamiento del programa para obtener el resultado final. En las secciones siguientes se mostrará prácticamente como se trabaja con el software ANSYS-CFX 14.5.

CAPÍTULO 3

3. MODELOS CFD

Los modelos CFD que se desarrollaron en este capítulo fueron realizados con la finalidad de mostrar de una manera eficaz y eficiente el comportamiento del fluido a través de los medidores de flujos. La secuencia para desarrollar estos modelos es: crear la geometría del fluido, mallado de la geometría, establecer parámetros y condiciones de frontera del fluido, resolución y resultados del modelo. Estas secuencias se explicarán en el desarrollo del presente capítulo.

3.1 Geometría de los Medidores

Dado que el estudio es sobre flujo interno, primeramente se creó la geometría del volumen de fluido que atraviesa el medidor de flujo, este volumen comprende desde la coordenada donde se mide la presión de entrada hasta la coordenada donde se mide la presión de salida.

Para desarrollar la geometría de los modelos CFD se utilizó el software SolidWorks ®2014; para posteriormente realizar la importación de estos archivos desde el software ANSYS 14.5.

3.1.1 Geometría del Venturi

Para crear la geometría del medidor primeramente se determinó las dimensiones constructivas de un tubo Venturi, estas dimensiones están establecidas en la International Standard ISO 2186. A continuación en la figura 3.1¹¹ se muestran las dimensiones constructivas de un tubo Venturi.

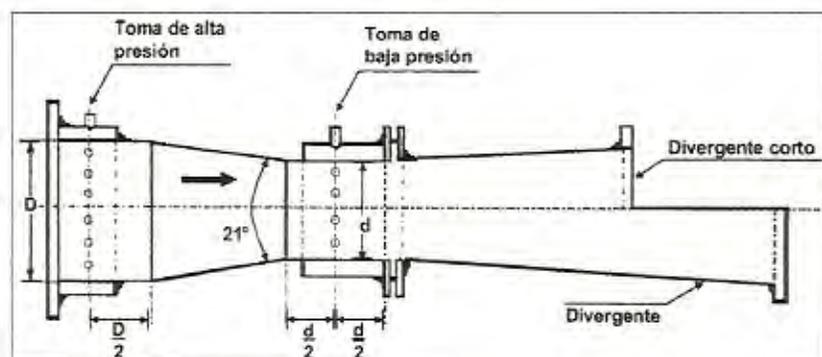


FIGURA 3.1 DIMENSIONES CONSTRUCTIVAS PARA EL MEDIDOR TUBO VENTURI

Donde; $D= 26\text{mm}$ y $d=16\text{mm}$ para este modelo.

¹¹International Standard ISO 2186, first edition.

Para la creación de la geometría del medidor tubo Venturi se utilizó el software SolidWorks ® 2014, el cual consistió en crear un croquis que contenía las dimensiones especificadas en la figura 3.1; y con el uso del comando revolución se creó el volumen del fluido que atraviesa el medidor de flujo Tubo Venturi (figura 3.2).



**FIGURA 3.2 GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DEL FLUIDO QUE
ATRAVIESA EL MEDIDOR TUBO VENTURÍ EN
SOLIDWORKS ® 2014**

Después se prosiguió a guardar el modelo tridimensional en formato IGES (.igs), formato reconocible para ANSYS 14.5, posteriormente se utiliza ANSYS-CFX 14.5 y se escoge geometría; después se importa desde esta ventana el modelo tridimensional (figura 3.3).



FIGURA 3.3 GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DEL FLUIDO QUE ATRAVIESA EL MEDIDOR TUBO VENTURÍ EN ANSYS-CFX 14.5

Se debe revisar que el modelo fue importado correctamente, es decir revisar que no existan volúmenes, superficies o puntos “huérfanos” y sin conectividad adecuada. Adicionalmente, se debe impedir que haya pequeños agujeros, esquinas demasiado ahusadas, aristas pequeñas, volúmenes, superficies, aristas o puntos duplicados.

3.1.2 Geometría de la Placa Orificio

Para crear la geometría del medidor primeramente se determinó las dimensiones constructivas de la Placa Orificio, estas dimensiones

están establecidas en la norma B.S. 1042¹². A continuación en la figura 3.4¹³ se muestran las dimensiones constructivas de una Placa Orificio.

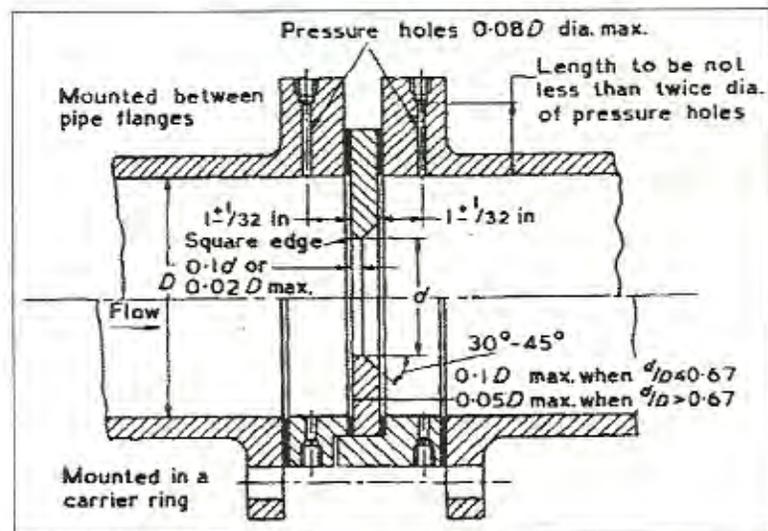


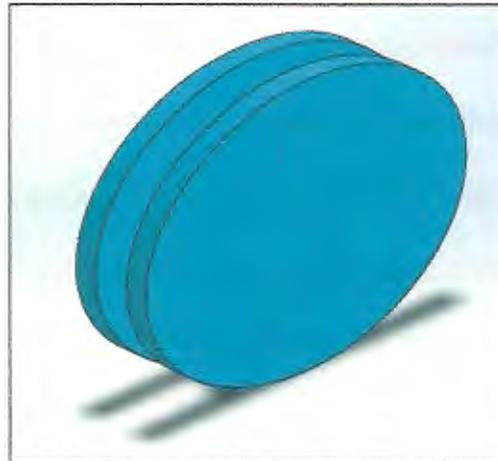
FIGURA 3.4 DIMENSIONES CONSTRUCTIVAS PARA EL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

Donde; $D = 51\text{mm}$ y $d = 20\text{mm}$ para este modelo.

Para la creación de la geometría del medidor Placa Orificio se utilizó el software SolidWorks ® 2014, el cual consistió en crear un croquis que contenía las dimensiones especificadas en la figura 3.4; y con el uso del comando revolución se creó el volumen del fluido que atraviesa el medidor de flujo Placa Orificio (figura 3.5).

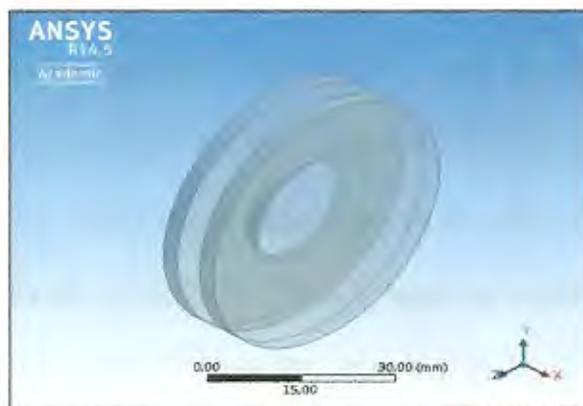
¹² Datasheet TecEquipment H10

¹³ B.S. 1042: Part 1: Methods for the measurement of fluid flow in pipes.



**FIGURA 3.5 GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DEL FLUIDO QUE
ATRAVIESA EL MEDIDOR PLACA ORIFICIO EN
SOLIDWORKS ® 2014**

Este modelo también se lo guardó en formato IGES (.igs), formato reconocible para ANSYS 14.5, posteriormente se utiliza ANSYS-CFX 14.5 y se escoge geometría; después se importa desde esta ventana el modelo tridimensional (figura 3.6).



**FIGURA 3.6 GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DEL FLUIDO QUE
ATRAVIESA EL MEDIDOR PLACA ORIFICIO EN ANSYS-CFX
14.5**

Se debe revisar que el modelo fue importado correctamente, es decir revisar que no existan volúmenes, superficies o puntos "huérfanos" y sin conectividad adecuada. Adicionalmente, se debe impedir que haya pequeños agujeros, esquinas demasiado ahusadas, aristas pequeñas, volúmenes, superficies, aristas o puntos duplicados.

3.2 Mallado

Para el mallado se debe tener presente que cerca de una superficie sólida se producen grandes gradientes de las propiedades físicas del fluido, por tanto se debe tener un mallado fino en la superficie donde interactúa el fluido con la superficie del medidor.

3.2.1 Mallado del Venturi

Se utilizó funciones de tamaño para controlar que el mallado sea fino en zonas con más curvaturas y más grueso en zonas con menos curvatura. Se utilizó un tamaño mínimo de 5.8112×10^{-6} m y un tamaño máximo de 1.1622×10^{-3} m. La tasa de crecimiento se eligió 1.1 y como ángulo 12° . Con esta función se logra que para superficies con una curvatura mayor a 12° en cualquier dirección. Se utilizó un tamaño de malla de 5.8112×10^{-6} m; este valor irá creciendo gradualmente en progresión geométrica con un factor de

1.1 hasta empatar con el tamaño de malla del resto de la superficie que es 1.1622×10^{-3} m. Se escogió una relevancia central lisa y fina obteniendo de esta manera un mallado con 69076 nodos y 377676 elementos tetraédricos (figura 3.7).



FIGURA 3.7 DETALLE DEL MALLADO DEL VENTURI

Después de haber seleccionado los parámetros y métodos correctos de mallados se prosigue a generar el mallado (figura 3.8).

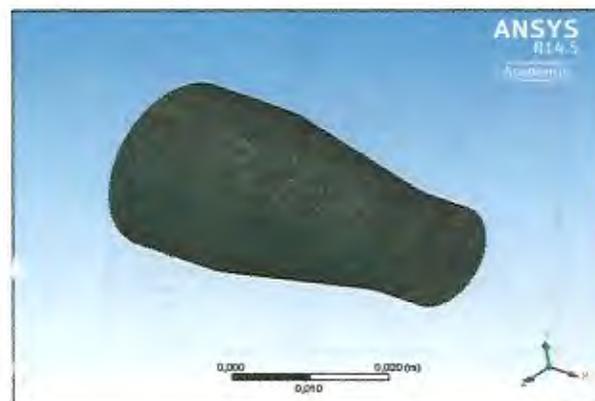


FIGURA 3.8 MALLADO DEL MEDIDOR TUBO VENTURI

3.2.2 Mallado de la Placa Orificio

Se utilizó funciones de tamaño para controlar que el mallado sea fino en zonas con más curvaturas y más grueso en zonas con menos curvatura. Se utilizó un tamaño mínimo de 7.2977×10^{-6} m y un tamaño máximo de 1.4595×10^{-3} m. La tasa de crecimiento se eligió 1.1 y como ángulo 12° . Con esta función se logra que para superficies con una curvatura mayor a 12° en cualquier dirección. Se utilizó un tamaño de malla de 7.2977×10^{-6} m; este valor irá creciendo gradualmente en progresión geométrica con un factor de 1.1 hasta empatar con el tamaño de malla del resto de la superficie que es 1.4595×10^{-3} m. Se escogió una relevancia central lisa y fina obteniendo de esta manera un mallado con 56860 nodos y 281450 elementos tetraédricos (figura 3.9).

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Relevance	100
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (12.0 °)
Min Size	Default (7.2977e-06 m)
Max Face Size	Default (1.4595e-03 m)
Max Size	Default (1.4595e-03 m)
Growth Rate	Default (1.30)
Minimum Edge Length	2.e-003 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	56860
Elements	281450
Mesh Metric	None

FIGURA 3.9 DETALLE DEL MALLADO DE LA PLACA ORIFICIO

Además se utilizó una inflación que consiste en realizar un refinamiento de la malla en la zona que el fluido hace contacto con la placa orificio. Se seleccionó el método inflación de espesor total con un número de capas de 10 y un crecimiento geométrico de 1.2 hasta llegar un espesor máximo de 3×10^{-3} m (figura 3.10).

Details of Inflation Settings	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	4 Faces
Inflation Option	Total Thickness
Number of Layers	10
Growth Rate	1.2
Maximum Thickness	3.e-003 m
Inflation Algorithm	Pre

FIGURA 3.10 DETALLE DE LA INFLACIÓN DE LA MALLA

Después de haber seleccionado los parámetros y métodos correctos de mallados se prosigue a generar el mallado (figura 3.11).

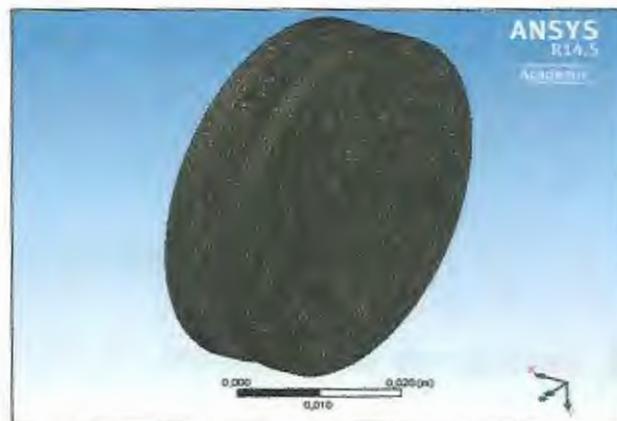


FIGURA 3.11 MALLADO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

3.3 Resolución

La resolución de la simulación consiste en introducir las condiciones de frontera y operación al modelo, además de seleccionar los modelos de turbulencia y algoritmos de resolución adecuados. Esta parte permite seleccionar los criterios de convergencia que para todas las simulaciones, que son tipo residual RMS (Root Mean Square-Media cuadrática) y una diferencia residual de 1×10^{-4} . Los controles de solución para el modelo de turbulencia estándar K- ϵ son los siguientes:

- ✓ Controles de presión
- ✓ Controles de cantidad de movimiento
- ✓ Controles de energía cinética turbulenta y de disipación turbulenta.

Para controlar cada una de estas variables se eligió el tipo alta resolución de primer orden, que ofrece una precisión para la mayoría de casos.

3.3.1 Resolución Venturi

El análisis consiste en realizar nueve simulaciones; los cuales poseen condiciones de frontera con valores que fueron obtenidas en el laboratorio de termofluidos, para cada simulación se

introducirá estos valores a la condición de frontera. La finalidad de la simulación es obtener la caída de presión que produce el medidor de flujo Tubo Venturi a cada régimen.

La resolución de estos modelos CFD empieza con definir el dominio del análisis; además de seleccionar el tipo de análisis que se va a realizar. Estas son llamadas condiciones de operación y son iguales para todas las simulaciones. A continuación en la tabla 3 se muestran las condiciones de operación para el modelo CFD.

TABLA 3
CONDICIONES DE OPERACIÓN

Tipo de análisis	Estado estable
Tipo de dominio	Fluido
Tipo de fluido	Agua
Presión de referencia	1 atm
Modelo de flotabilidad	No flotabilidad
Dominio de movimiento	Estacionario
Tipo de transferencia de calor	Isotérmico
Temperatura del fluido	27 °C
Modelo de turbulencia	k-Épsilon

Una vez seleccionado las condiciones de operación se prosigue a introducir las condiciones de frontera, que para este modelo hay 3 fronteras:

- ✓ Entrada (Inlet)

- ✓ Salida (Outlet)
- ✓ Pared (Wall)

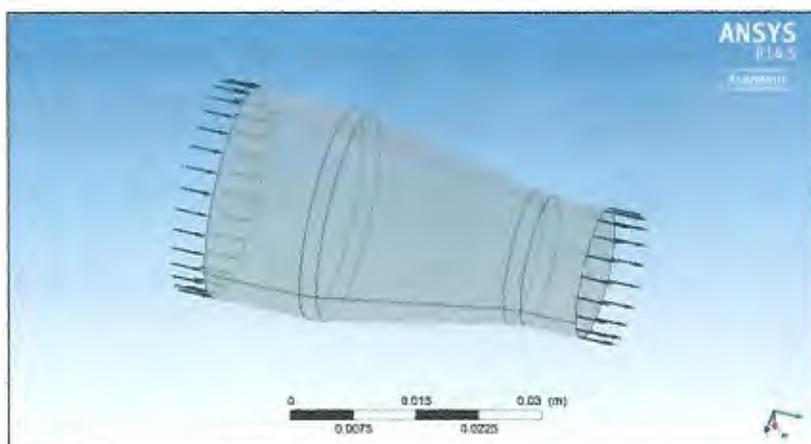


FIGURA 3.12 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO TUBO VENTURI

Los valores de las condiciones de frontera para cada simulación varían, la tabla 4 muestra estos valores para cada simulación.

**TABLA 4
CONDICIONES DE FRONTERA PARA CADA SIMULACIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI**

Simulaciones		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fronteras	Espec. del fluido	Condición del fluido								
		Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
Entrada	Subsónico	105029	104608	104177	103922	103608	103363	103128	102913	102795
salida	Subsónico	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)
		0,4894	0,4426	0,4056	0,3644	0,3333	0,2920	0,2562	0,2246	0,2109
Pared	-	no deslizamiento y liso								

La finalidad de cada simulación es obtener como resultado el coeficiente de descarga a diferentes números de Reynolds, por esta razón se añade unas expresiones en el simulador para lograr calcular el coeficiente de descarga. Las expresiones son las siguientes:

$$d = 0.016 \text{ [m]}$$

$$D = 0.026 \text{ [m]}$$

$$B = d/D$$

$$\text{Visc.} = \text{Dynamic Viscosity/Density}$$

$$m_r = \text{massFlow()}@INLET$$

$$\text{Re (Número de Reynolds)} = (m_r * D) / (\text{Visc} * \text{Density} * \text{área()}@INLET)$$

$$H_1 = (\text{AreaAve(Pressure)}@INLET - 101325 \text{ [Pa]}) / (\text{Density} * g)$$

$$H_2 = (\text{AreaAve(Pressure)}@OUTLET - 101325 \text{ [Pa]}) / (\text{Density} * g)$$

$$E_1 = (N_r * \text{Visc.}) / (D * (B^2))$$

$$E_2 = (1 - (B^4)) / (2 * g * (H_1 - H_2))$$

$$C_d \text{ (Coeficiente de descarga)} = E_1 * (E_2^{0.5})$$

La convergencia de los datos es muy importante, para ello se utiliza el gráfico de convergencia de residuos. En el gráfico de residuos se muestra los residuos de la ecuación de la continuidad, velocidad x, velocidad y, velocidad z, energía cinética turbulenta y disipación

turbulenta. Lo deseable es que los residuos sean lo más pequeños posibles (1×10^{-4}).

A continuación se grafica los residuos de la primera simulación, observando este gráfico se da cuenta de cómo avanzó el proceso iterativo. Todas las gráficas de convergencia terminan cuando la diferencia residual sea igual o menor a 1×10^{-4} en todas sus variables o que el simulador haga 400 iteraciones.

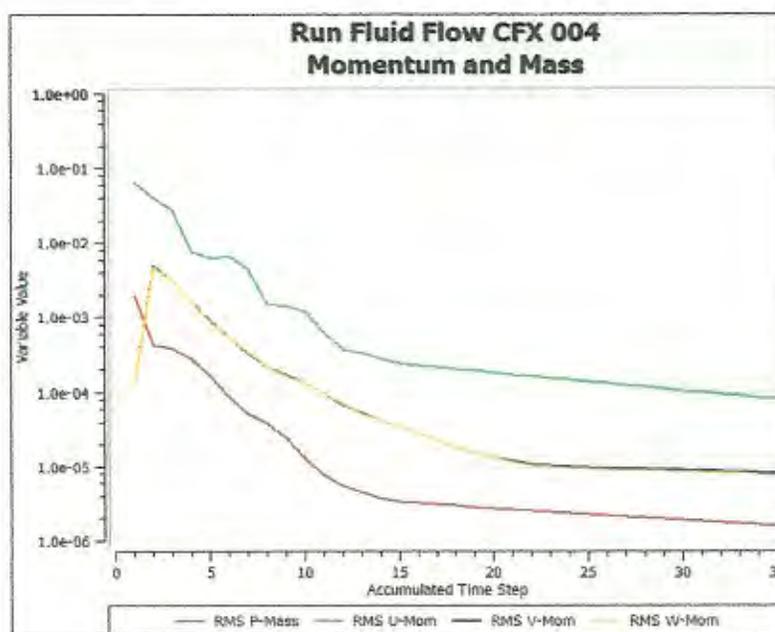


FIGURA 3.13 GRÁFICO DE CONVERGENCIA DE VARIABLES VELOCIDAD X, VELOCIDAD Y, VELOCIDAD Z Y PRESIÓN DE LA PRIMERA SIMULACIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI

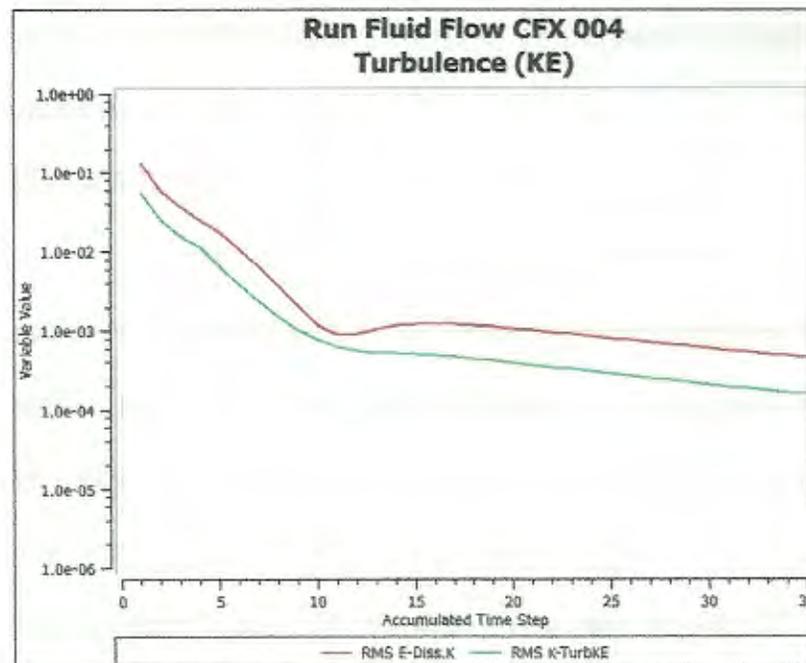


FIGURA 3.14 GRÁFICO DE CONVERGENCIA DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA Y DISIPACIÓN TURBULENTA DE LA PRIMERA SIMULACIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI

Los gráficos de convergencia en las otras simulaciones son similares por las que no son necesarias mostrarlas en el desarrollo de esta sección.

3.3.2 Resolución Placa Orificio

El análisis consiste en realizar nueve simulaciones; los cuales poseen condiciones de frontera con valores que fueron obtenidas en el laboratorio de termofluidos, para cada simulación se

introducirá estos valores a la condición de frontera. La finalidad de la simulación es obtener la caída de presión que produce el medidor de flujo Placa Orificio a cada régimen.

La resolución de estos modelos CFD empieza con definir el dominio del análisis; además de seleccionar el tipo de análisis que se va a realizar. Estas son llamadas condiciones de operación y son iguales para todas las simulaciones. A continuación en la tabla 5 se muestran las condiciones de operación para este modelo CFD.

TABLA 5
CONDICIONES DE OPERACIÓN

Tipo de análisis	Estado estable
Tipo de dominio	Fluido
Tipo de fluido	Agua
Presión de referencia	1 atm
Modelo de flotabilidad	No flotabilidad
Dominio de movimiento	Estacionario
Tipo de transferencia de calor	Isotérmico
Temperatura del fluido	27 °C
Modelo de turbulencia	k-Épsilon

Una vez seleccionado las condiciones de operación se prosigue a introducir las condiciones de frontera, que para este modelo tiene 3 fronteras:

- ✓ Entrada (Inlet)

✓ Salida (Outlet)

✓ Pared (Wall)

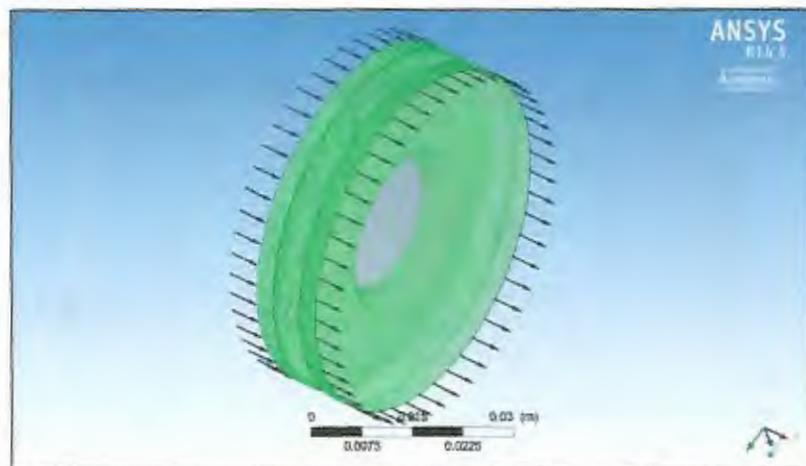


FIGURA 3.15 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO PLACA ORIFICIO

Los valores de las condiciones de frontera para cada simulación varían, la tabla 6 muestra estos valores para cada simulación.

**TABLA 6
CONDICIONES DE FRONTERA PARA CADA SIMULACIÓN
DEL MEDIDOR DE FLUJO PLACA ORIFICIO**

Simulaciones		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fronteras	Espec. del fluido	Condición del fluido								
		Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
Entrada	Subsónico	104873	104461	104108	103755	103530	103285	103069	102873	102795
salida	Subsónico	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)
		0,4894	0,4426	0,4056	0,3644	0,3333	0,2920	0,2562	0,2246	0,2109
Pared	-	no deslizamiento y liso								

La finalidad de cada simulación es obtener como resultado el coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds, por esta razón se añade unas expresiones en el simulador para lograr calcular el coeficiente de descarga. Las expresiones son las siguientes:

$$d = 0.02 \text{ [m]}$$

$$D = 0.051 \text{ [m]}$$

$$B = d/D$$

$$\text{Visc.} = \text{Dynamic Viscosity/Density}$$

$$m_r = \text{massFlow()}@INLET$$

$$\text{Re (Número de Reynolds)} = (m_r * D) / (\text{Visc} * \text{Density} * \text{área()}@INLET)$$

$$H_1 = (\text{AreaAve(Pressure)}@INLET - 101325 \text{ [Pa]}) / (\text{Density} * g)$$

$$H_2 = (\text{AreaAve(Pressure)}@OUTLET - 101325 \text{ [Pa]}) / (\text{Density} * g)$$

$$E_1 = (N_r * \text{Visc.}) / (D * (B^2))$$

$$E_2 = (1 - (B^4)) / (2 * g * (H_1 - H_2))$$

$$C_d \text{ (Coeficiente de descarga)} = E_1 * (E_2^{0.5})$$

La convergencia de los datos es muy importante, para ello se utiliza el gráfico de convergencia de residuos. En el gráfico de residuos se muestra los residuos de la ecuación de la continuidad, velocidad x, velocidad y, velocidad z, energía cinética turbulenta y disipación

turbulenta. Lo deseable es que los residuos sean lo más pequeños posibles (1×10^{-4}).

A continuación se grafica los residuos de la primera simulación, observando este gráfico se da cuenta de cómo avanzó el proceso iterativo. Todas las gráficas de convergencia terminan cuando la diferencia residual sea igual o menor a 1×10^{-4} en todas sus variables; o que el simulador haga 500 iteraciones.

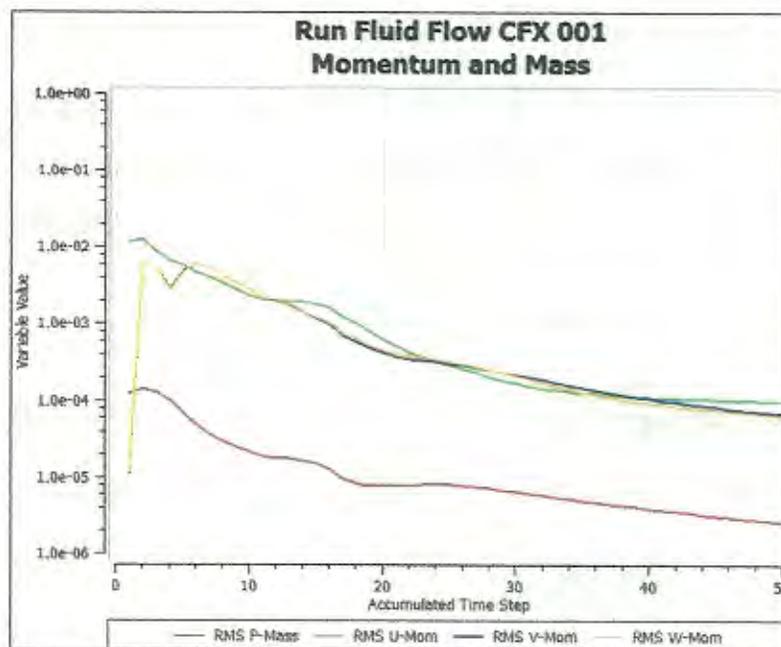


FIGURA 3.16 GRÁFICO DE CONVERGENCIA DE VARIABLES VELOCIDAD X, VELOCIDAD Y, VELOCIDAD Z Y PRESIÓN DE LA PRIMERA SIMULACIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO PLACA ORIFICIO

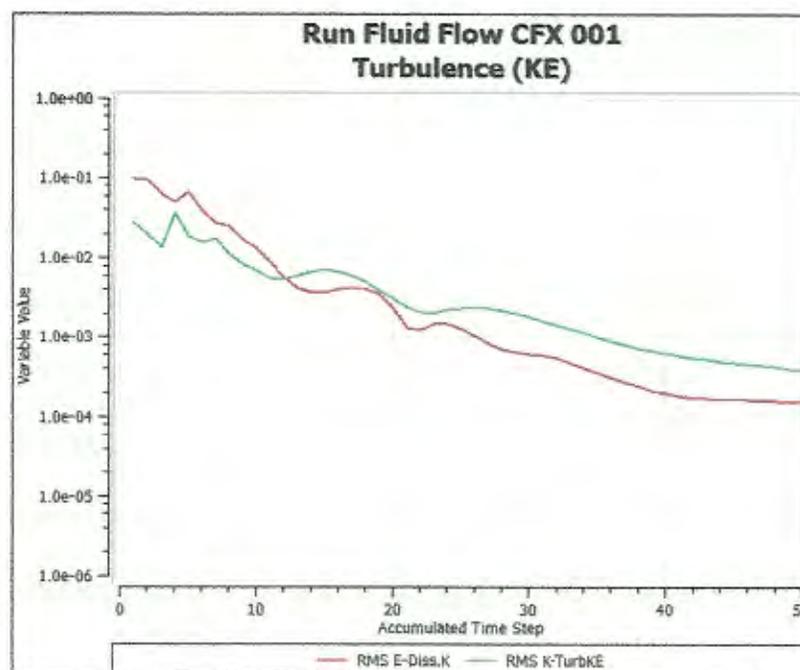


FIGURA 3.17 GRAFICO DE CONVERGENCIA DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA Y DISIPACIÓN TURBULENTA DE LA PRIMERA SIMULACIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO PLACA ORIFICIO

Los gráficos de convergencia en las otras simulaciones son similares por las que no son necesarias mostrarlas en el desarrollo de esta sección.

3.4 Resultados CFD

Los resultados CFD corresponden al post-procesador que es el que permite analizar, visualizar y representar los resultados. Los

resultados que muestra y permite realizar el simulador ANSYS-CFX son:

- ✓ Visualización de la geometría y volúmenes de control.
- ✓ Mostrar la dirección y la magnitud del flujo.
- ✓ Visualización de la variación de variables escalares.
- ✓ Permite realizar cálculos numéricos cuantitativos
- ✓ Realizar animaciones
- ✓ Representar las características físicas (Presión, velocidad, temperatura, etc...) mediante planos o volúmenes.

Para estos modelos CFD solo se mostrarán contornos de presión alrededor de todo el volumen de control, contornos de presión en plano medio del volumen de control, contornos de velocidad alrededor de todo el volumen de control, contornos de velocidad en plano medio del volumen de control, líneas de corriente en plano medio del volumen de control y calcular el coeficiente de descarga mediante las expresiones realizadas en el pre-procesador.

3.4.1 Resultado Venturi

Los resultados de las nueve simulaciones del modelo de medidor de flujo Tubo Venturi se dividen en contornos de velocidad, contornos de presión y cálculo del coeficiente de descarga.

3.4.1.1 Contornos de Velocidad

A continuación se grafican los contornos de la velocidad neta para cada uno de las nueve simulaciones luego de haber alcanzado la convergencia. Para lograr una mejor interpretación de los resultados alcanzados y observar de una mejor manera el comportamiento del fluido a través del medidor de flujo Tubo Venturi, se realizaran los contornos en un plano que atraviesa al todo el volumen del fluido por la mitad. El análisis de los gráficos se los realizará en el capítulo 5.

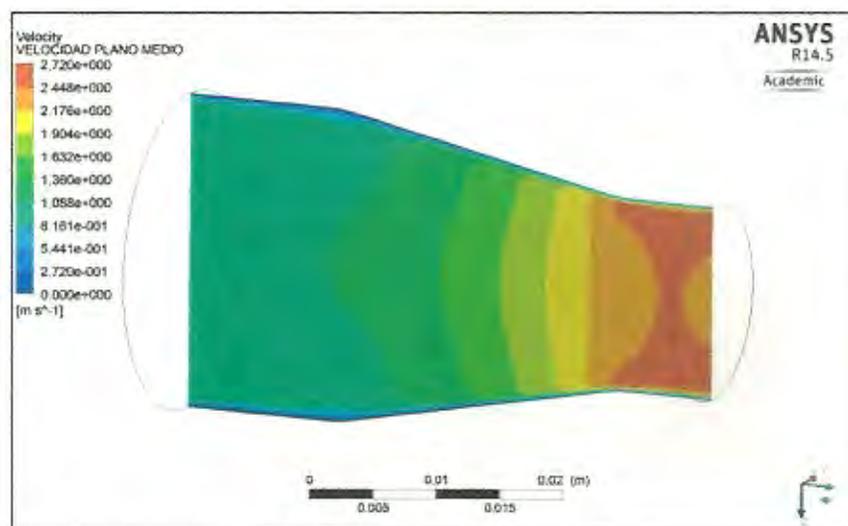


FIGURA 3.18 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 25484.8 (PRIMERA SIMULACIÓN)

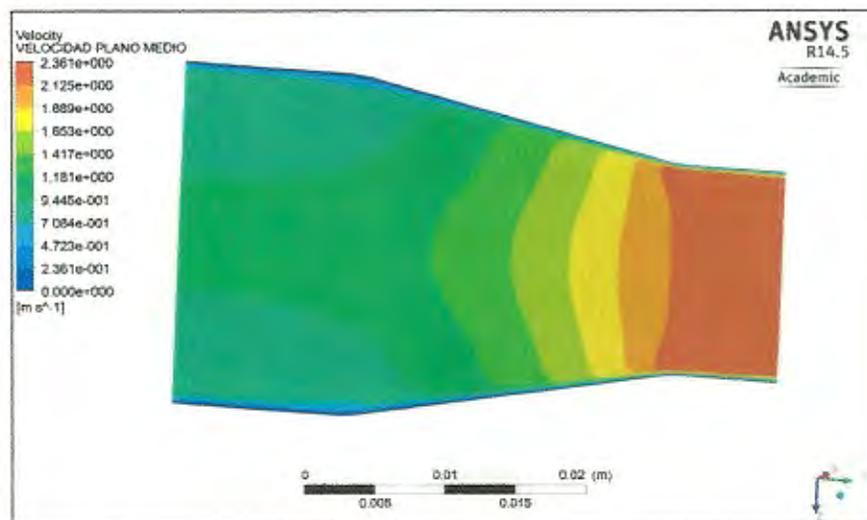


FIGURA 3.19 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 22972.4 (SEGUNDA SIMULACIÓN)

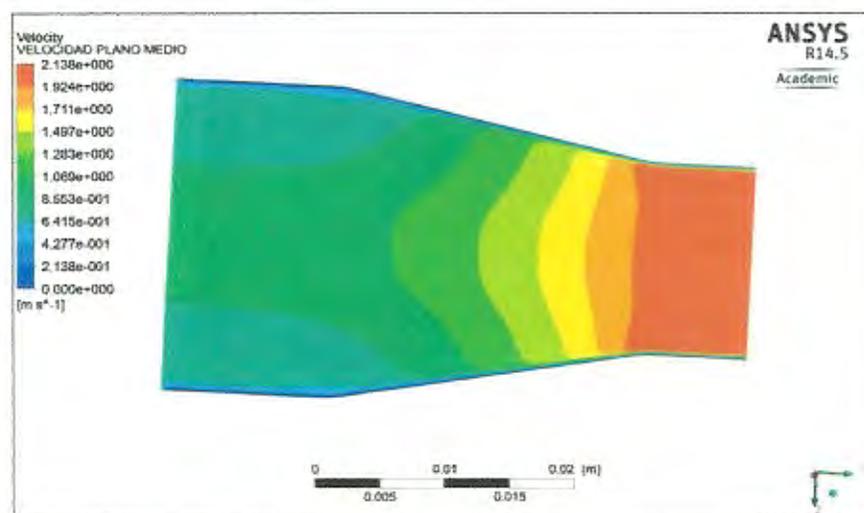


FIGURA 3.20 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 21051.3 (TERCERA SIMULACIÓN)

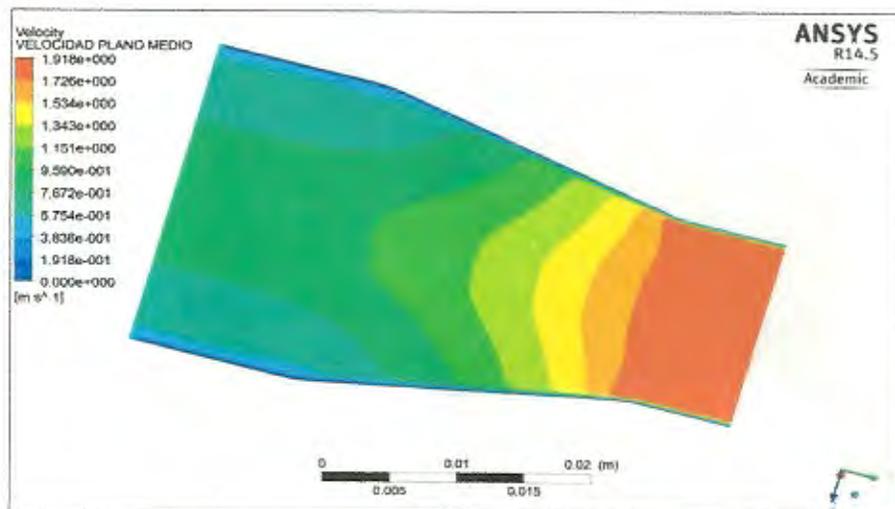


FIGURA 3.21 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 18910.8 (CUARTA SIMULACIÓN)

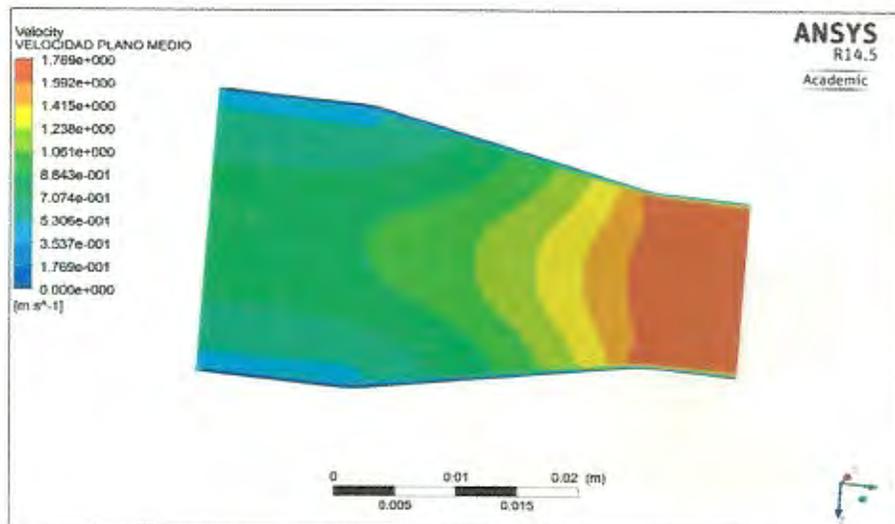


FIGURA 3.22 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 17299.5 (QUINTA SIMULACIÓN)

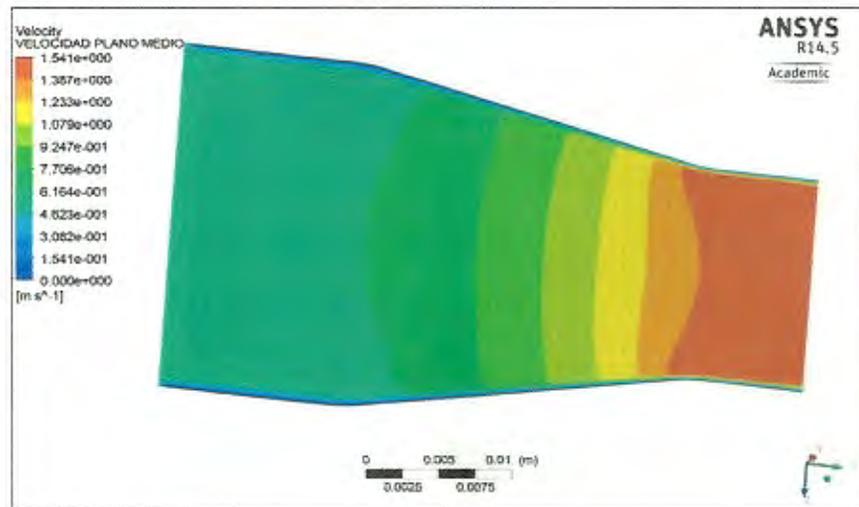


FIGURA 3.23 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 16077.2 (SEXTA SIMULACIÓN)

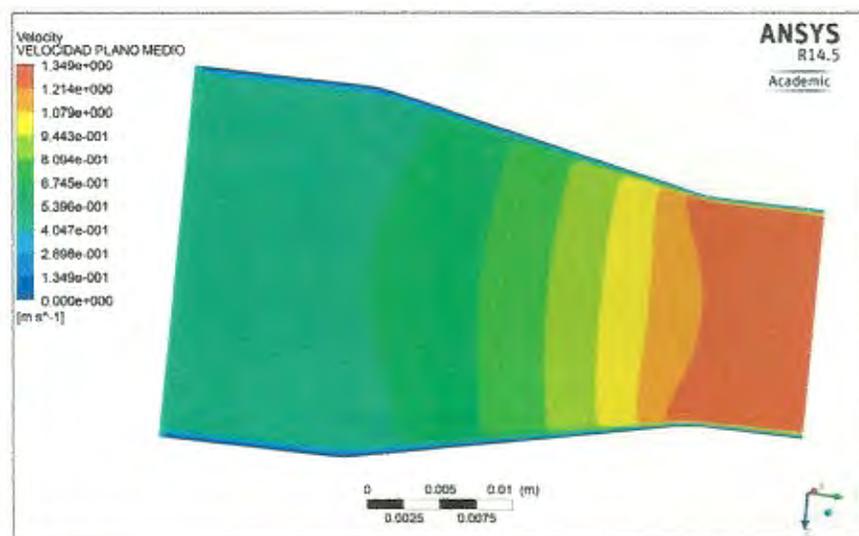


FIGURA 3.24 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 14113.7 (SÉPTIMA SIMULACIÓN)

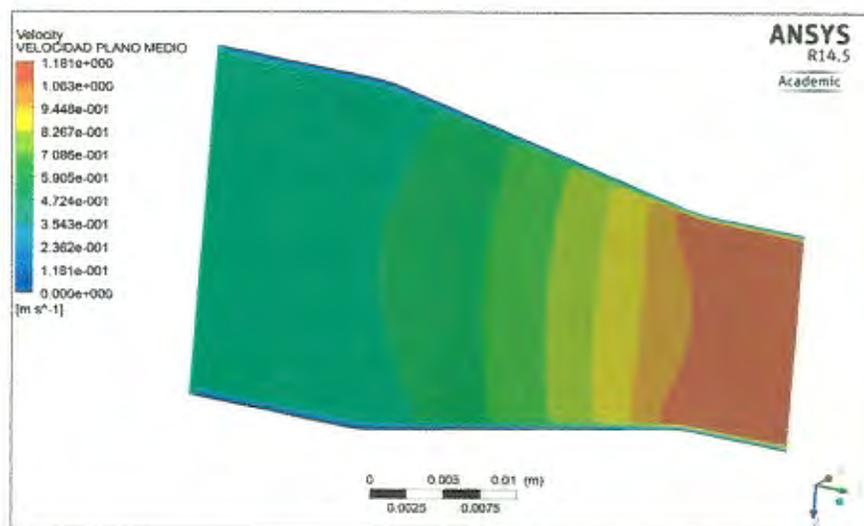


FIGURA 3.25 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 12362 (OCTAVA SIMULACIÓN)

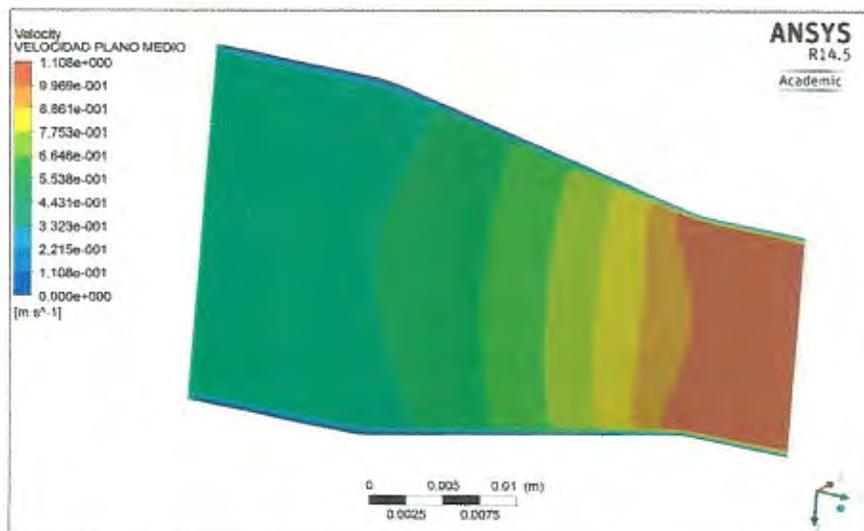
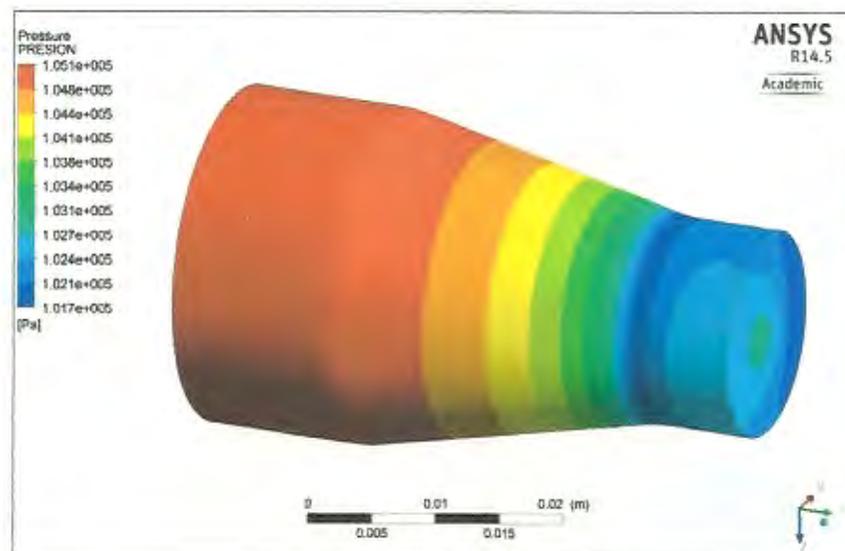


FIGURA 3.26 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 11616.7 (NOVENA SIMULACIÓN)

3.4.1.2 Contornos de presión

A continuación se grafican los contornos de presión para las nuevas simulaciones. Existirán dos tipos de contornos, un contorno que muestra la presión en todo el volumen de control y otro contorno que muestra la presión en la mitad del volumen de control. El análisis se lo realizará en el capítulo 5.



**FIGURA 3.27 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI
A RE: 25484.8 (PRIMERA SIMULACIÓN)**

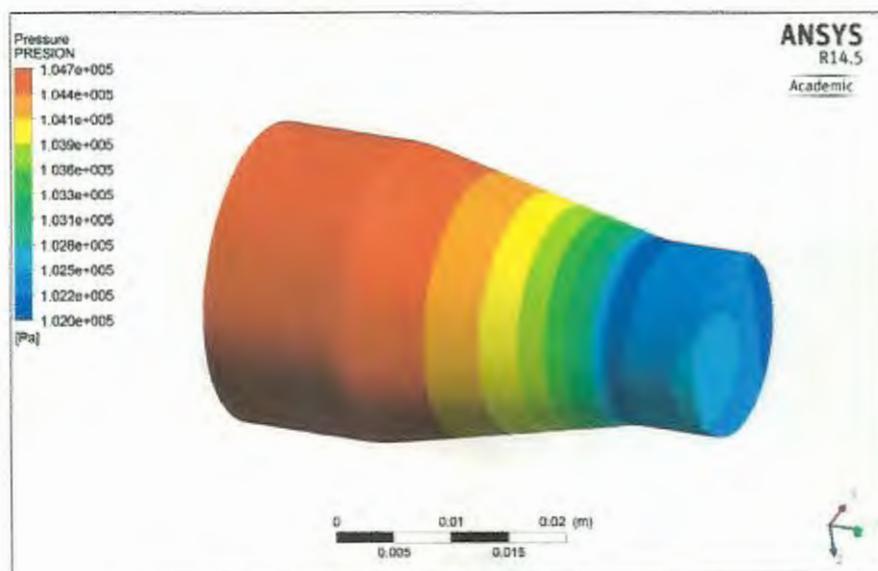


FIGURA 3.28 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 22972.4 (SEGUNDA SIMULACIÓN)

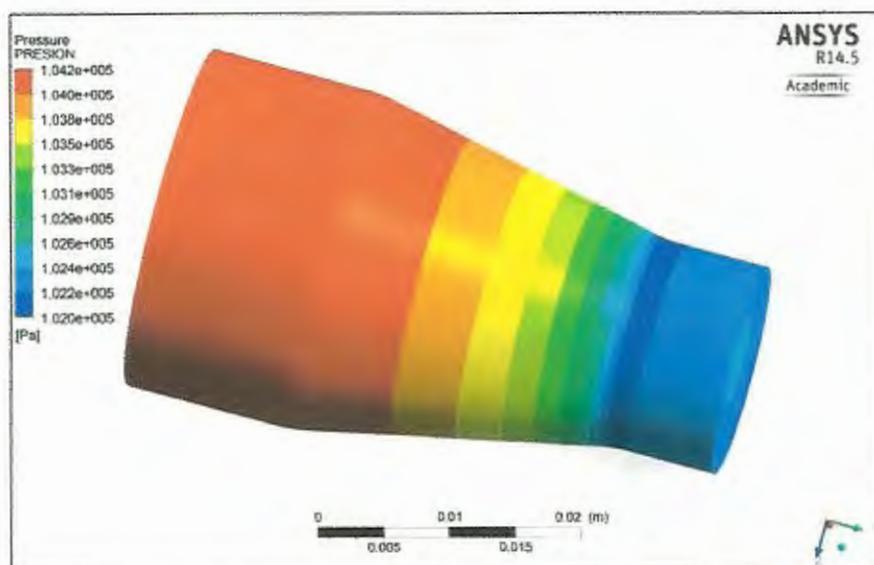


FIGURA 3.29 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 21051.3 (TERCERA SIMULACIÓN)

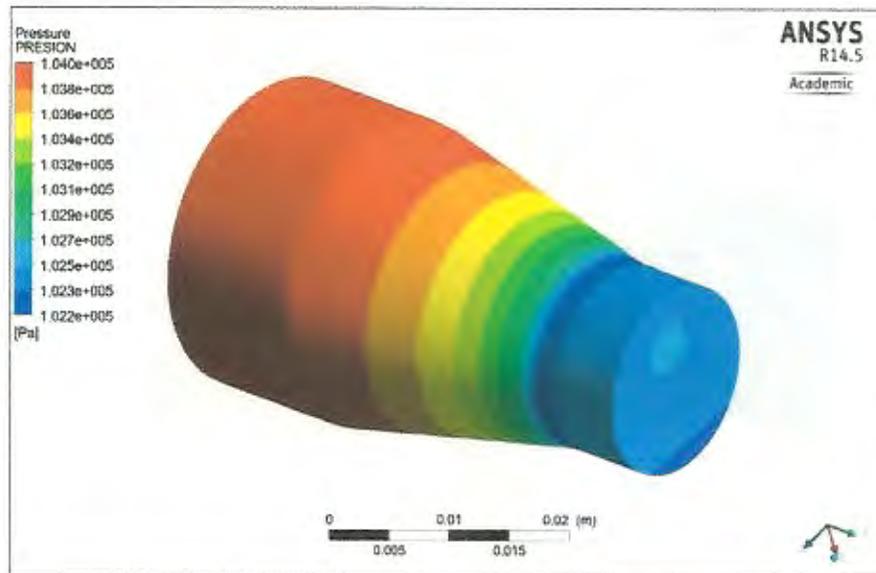


FIGURA 3.30 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 18910.8 (CUARTA SIMULACIÓN)

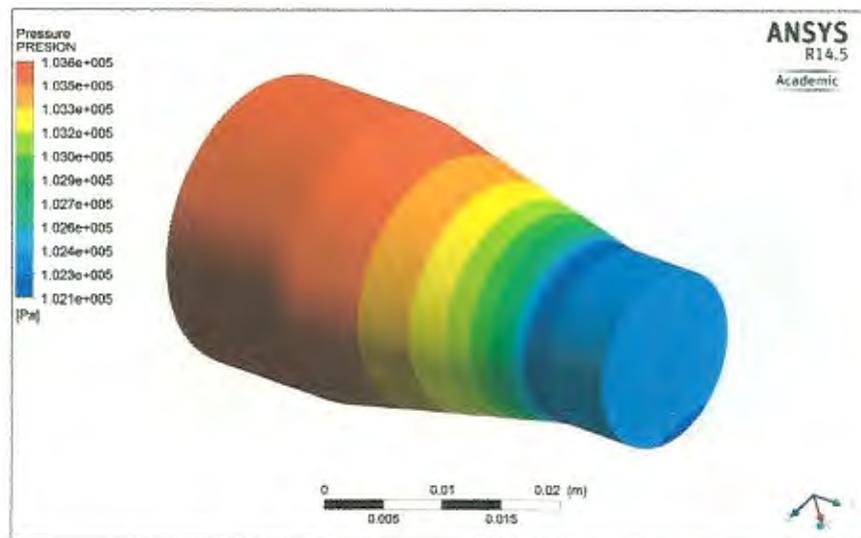


FIGURA 3.31 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 17299.5 (QUINTA SIMULACIÓN)

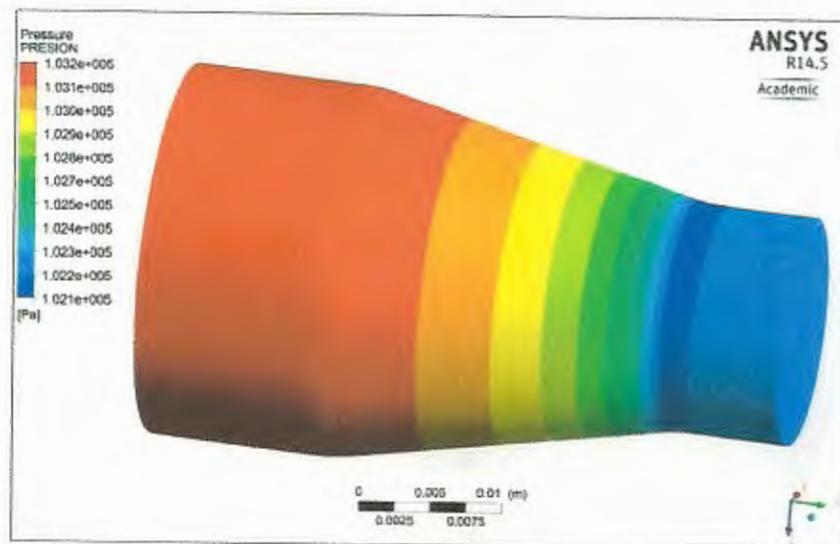


FIGURA 3.32 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 16077.2 (SEXTA SIMULACIÓN)

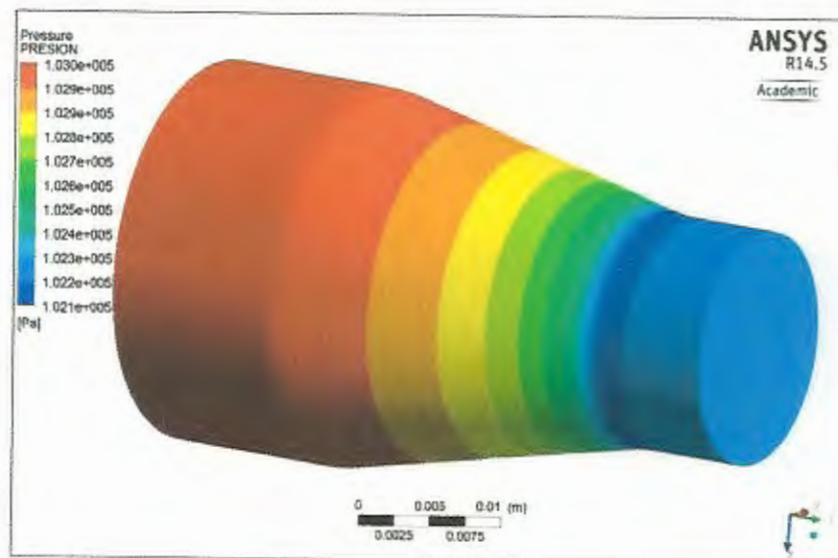


FIGURA 3.33 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 14113.7 (SÉPTIMA SIMULACIÓN)

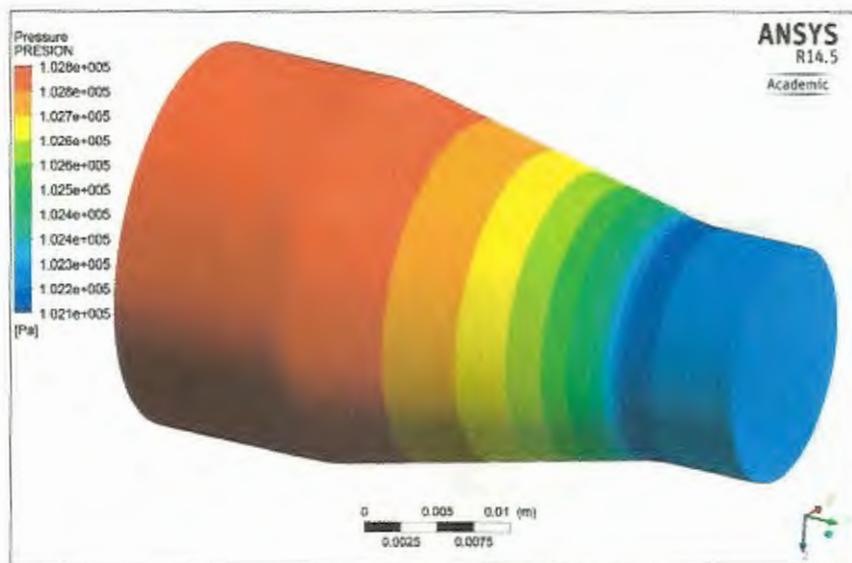


FIGURA 3.34 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 12362 (OCTAVA SIMULACIÓN)

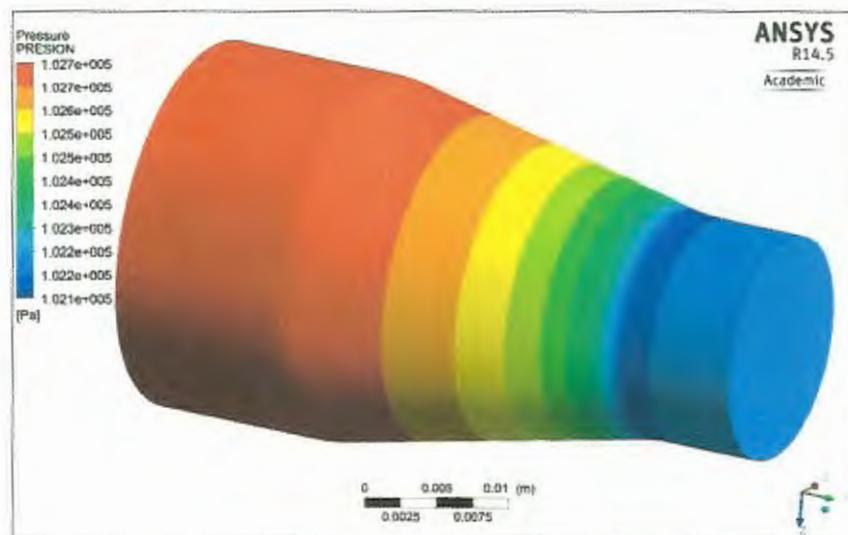


FIGURA 3.35 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 11616.7 (NOVENA SIMULACIÓN)

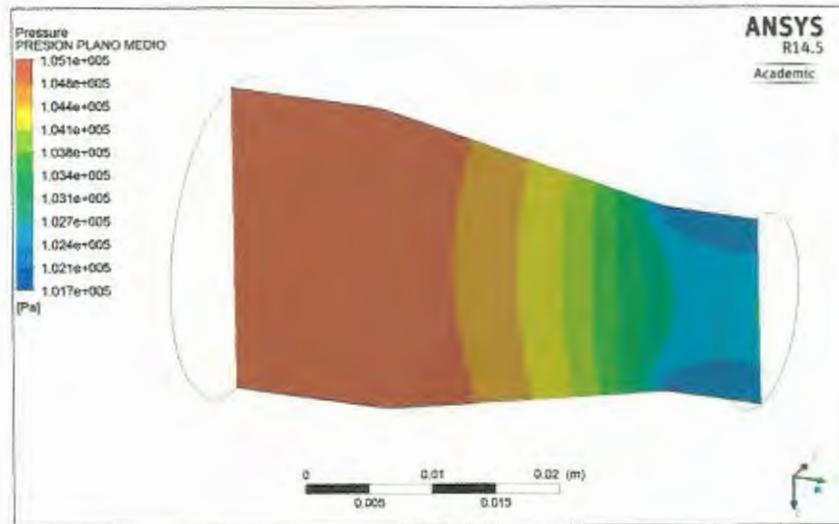


FIGURA 3.36 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 25484.8 (PRIMERA SIMULACIÓN)

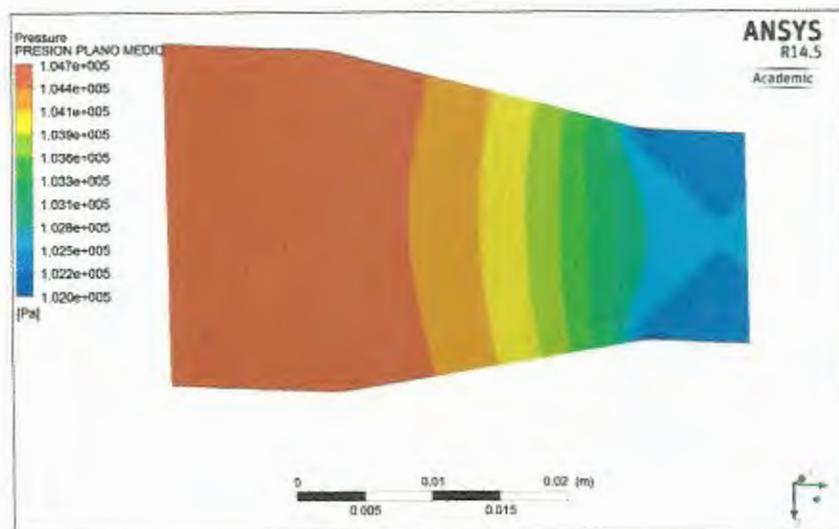


FIGURA 3.37 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 22972.4 (SEGUNDA SIMULACIÓN)

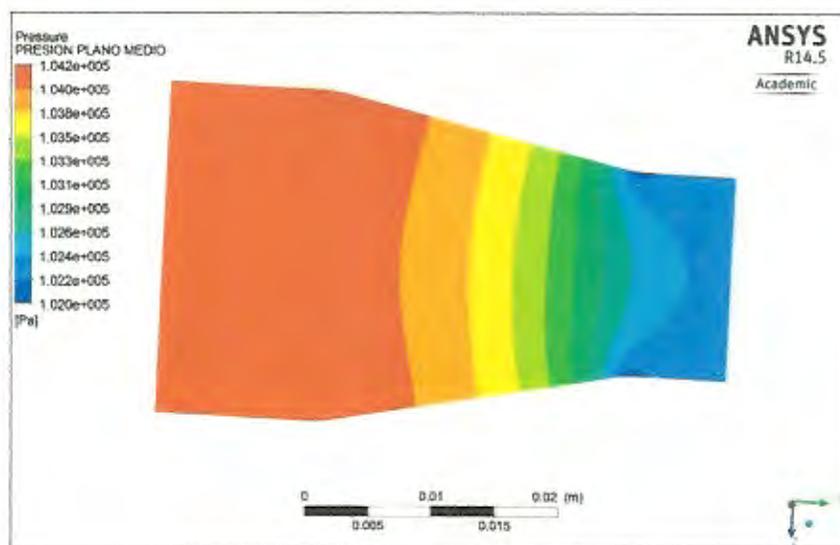


FIGURA 3.38 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 21051.3 (TERCERA SIMULACIÓN)

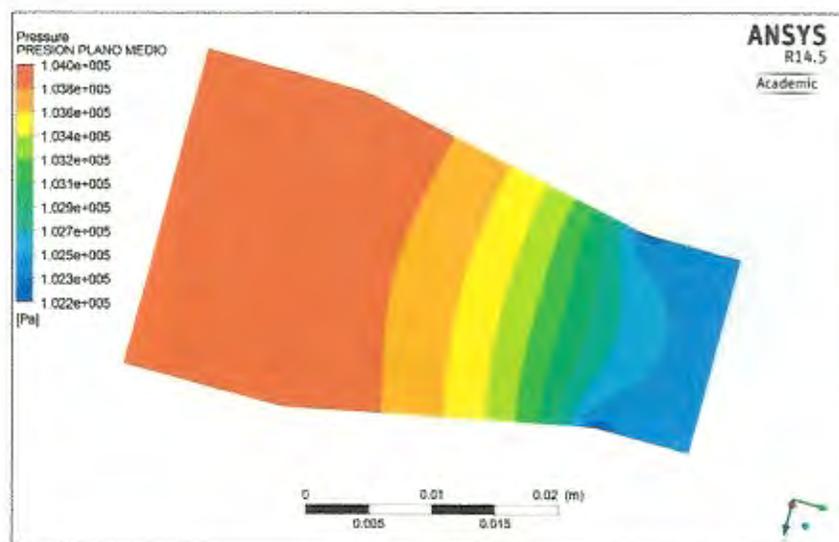


FIGURA 3.39 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 18910.8 (CUARTA SIMULACIÓN)

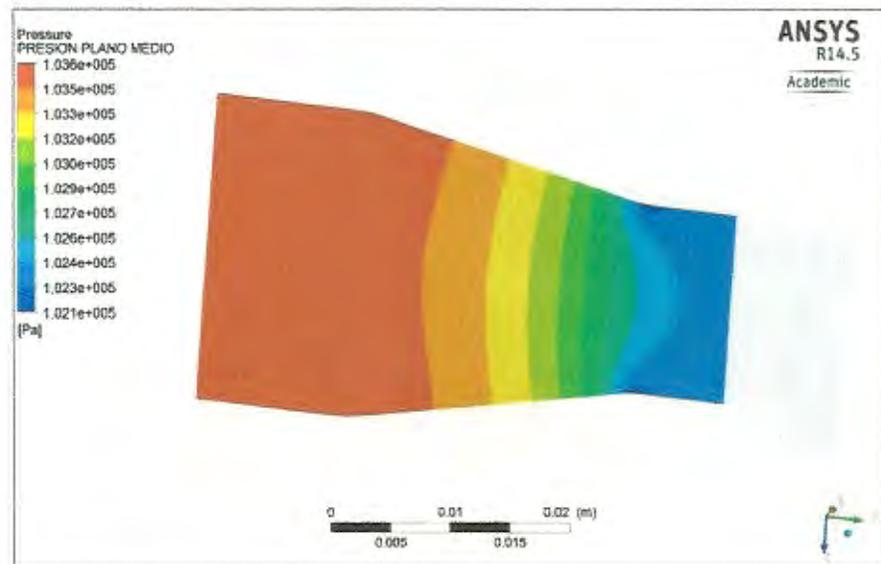


FIGURA 3.40 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 17299.5 (QUINTA SIMULACIÓN)

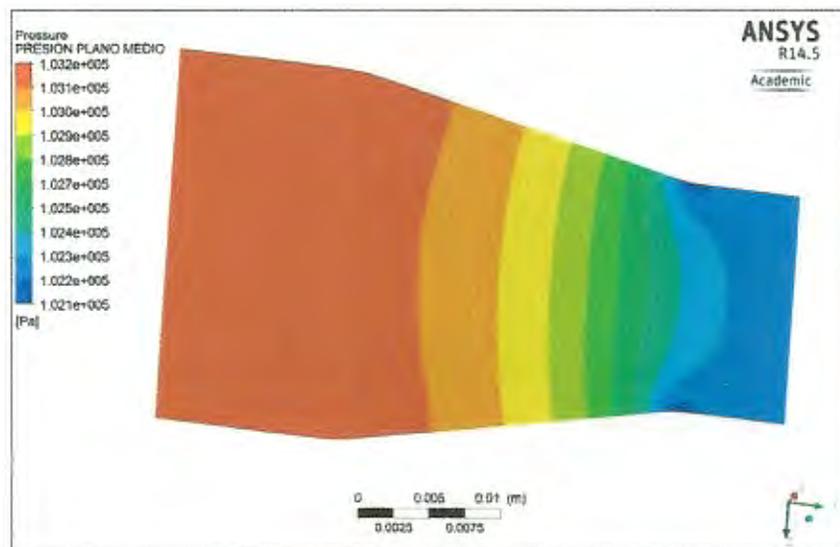


FIGURA 3.41 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 16077.2 (SEXTA SIMULACIÓN)

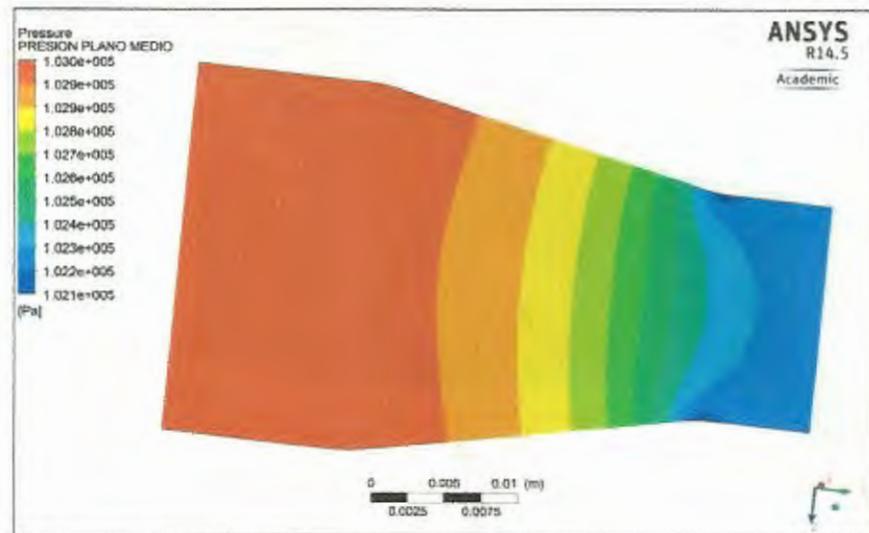


FIGURA 3.42 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 14113.7 (SÉPTIMA SIMULACIÓN)

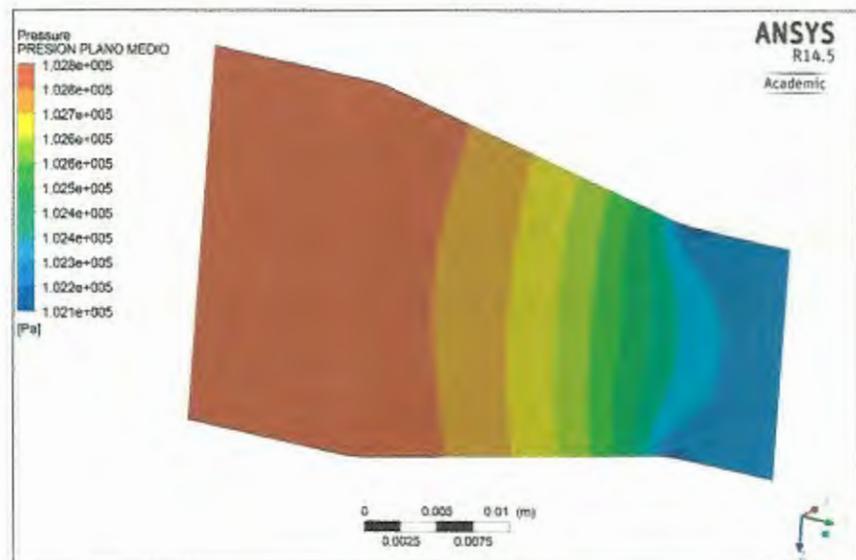


FIGURA 3.43 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 12362 (OCTAVA SIMULACIÓN)

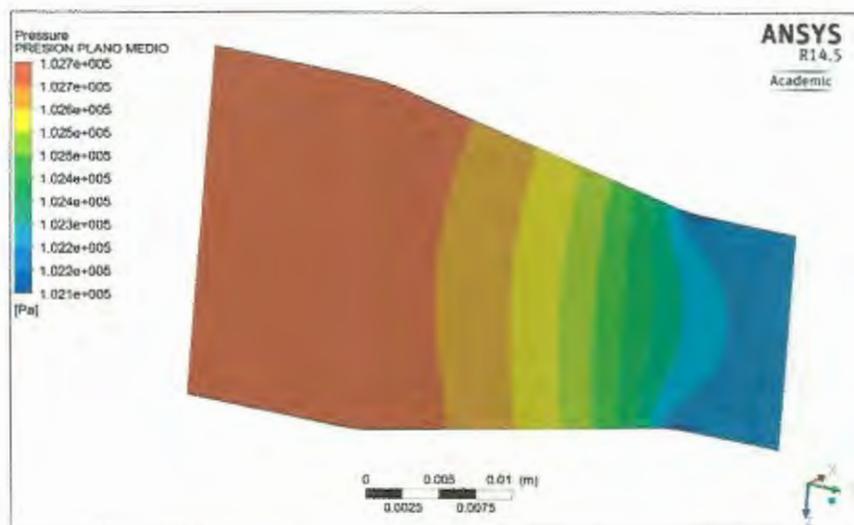


FIGURA 3.44 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR VENTURI A RE: 11616.7 (NOVENA SIMULACIÓN)

3.4.1.3 Comportamiento del Coeficiente de Descarga a Diferente número de Reynolds.

Además de graficar contornos de presión y velocidad, el simulador también calculó el coeficiente de descarga y número de Reynolds para cada simulación. A continuación en la tabla 7 se muestran estos valores obtenidos.

TABLA 7
RESULTADOS OBTENIDOS DE COEFICIENTE DE
DESCARGA Y NÚMERO DE REYNOLDS DEL MEDIDOR
VENTURI

Simulación	Re	C_d
1	25484.8	0.9881
2	22972.4	0.9749
3	21051.3	0.9670
4	18910,8	0.9494
5	17299.5	0.9413
6	16077.2	0.9097
7	14113.7	0,9015
8	12362	0.8994
9	11616.7	0.9006

A continuación se muestra en la figura 3.45 el polinomio de regresión que mejor se ajusta a los valores obtenidos en la tabla 3.5. El programa para encontrar el polinomio de regresión y graficar estos valores, se muestran en el Apéndice C.

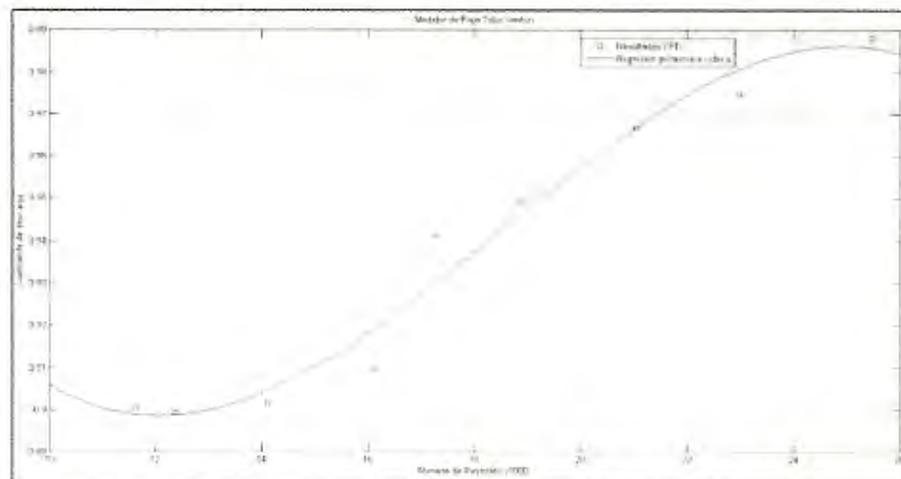


FIGURA 3.45 GRAFICO COEFICIENTE DE DESCARGA VS
NÚMERO DE REYNOLDS OBTENIDOS MEDIANTE CFD

La ecuación obtenida mediante el software Matlab es:

$$C_d = -8.16 \times 10^{-5} Re^3 + 0.00453 Re^2 - 0.0736 Re + 0.949 \quad \text{Ec. 3.1}$$

El análisis de estos datos obtenidos y de la gráfica 3.45 se realizará en el capítulo 5.

3.4.2 Resultado Placa Orificio

Los resultados de las nueve simulaciones del modelo de medidor de flujo Placa Orificio se dividen en contornos de velocidad, contornos de presión y cálculo del coeficiente de descarga.

3.4.2.1 Contornos de Velocidad

A continuación se grafican los contornos de la velocidad neta para cada uno de las nueve simulaciones; luego de haber alcanzado la convergencia. Para lograr una mejor interpretación de los resultados alcanzados y observar de una mejor manera el comportamiento del fluido a través del medidor de flujo Placa orificio, se realizarán los contornos en un plano que atraviesa al todo el volumen del fluido por la mitad. El análisis de los gráficos se los realizará en el capítulo 5.

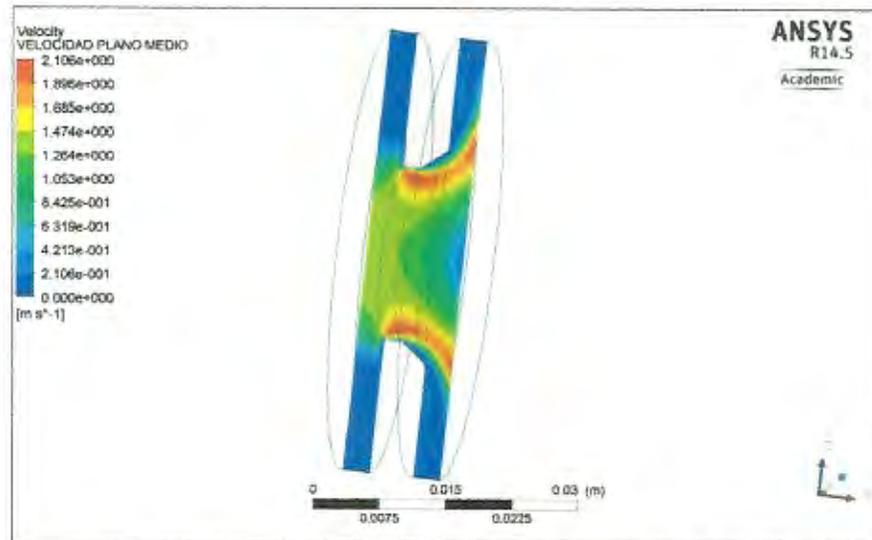


FIGURA 3.46 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 12941.8 (PRIMERA SIMULACIÓN)

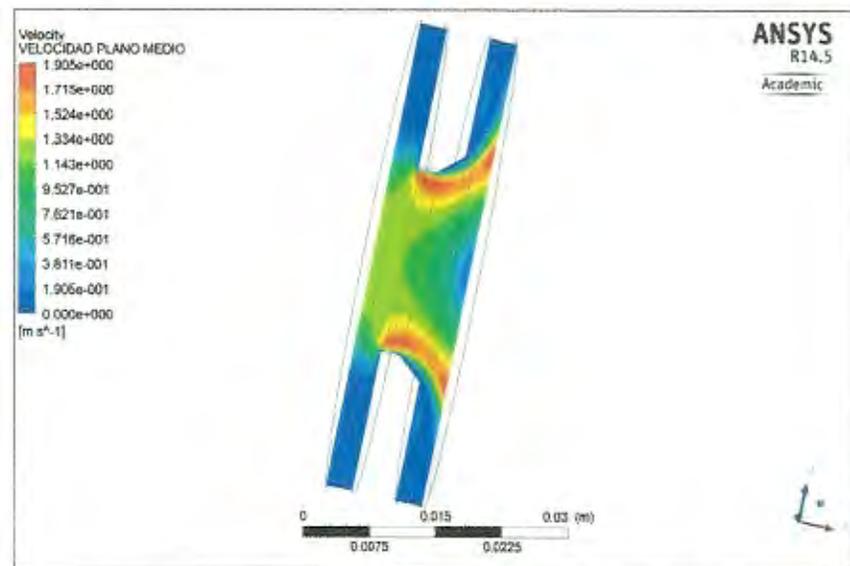


FIGURA 3.47 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 11713.5 (SEGUNDA SIMULACIÓN)

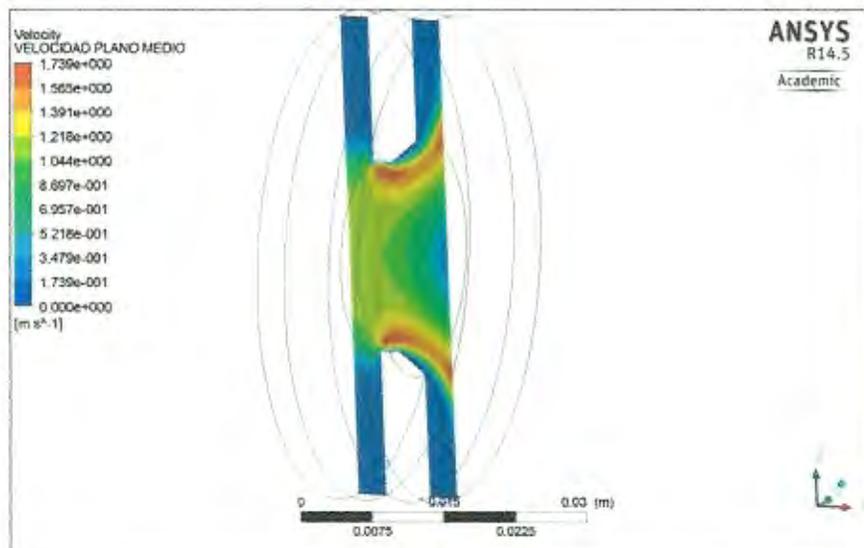


FIGURA 3.48 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 10733.1 (TERCERA SIMULACIÓN)

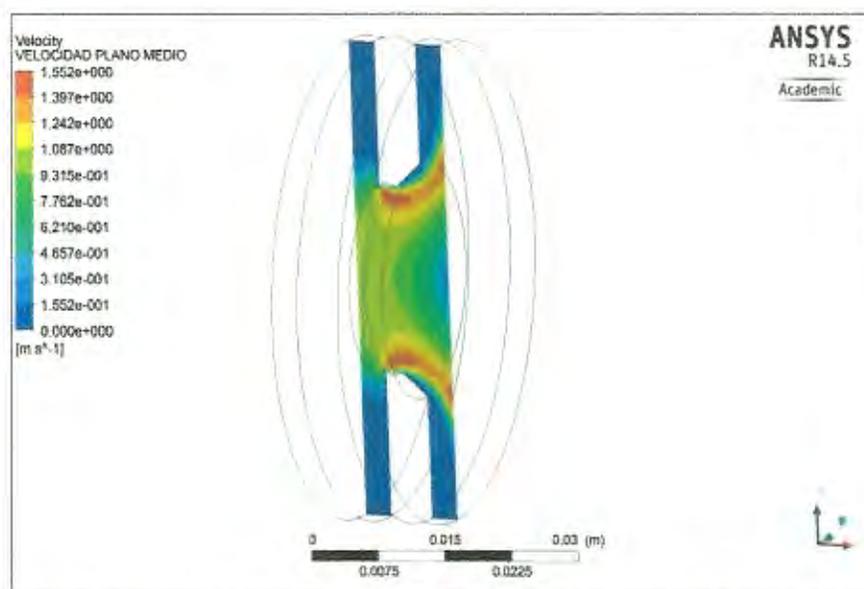
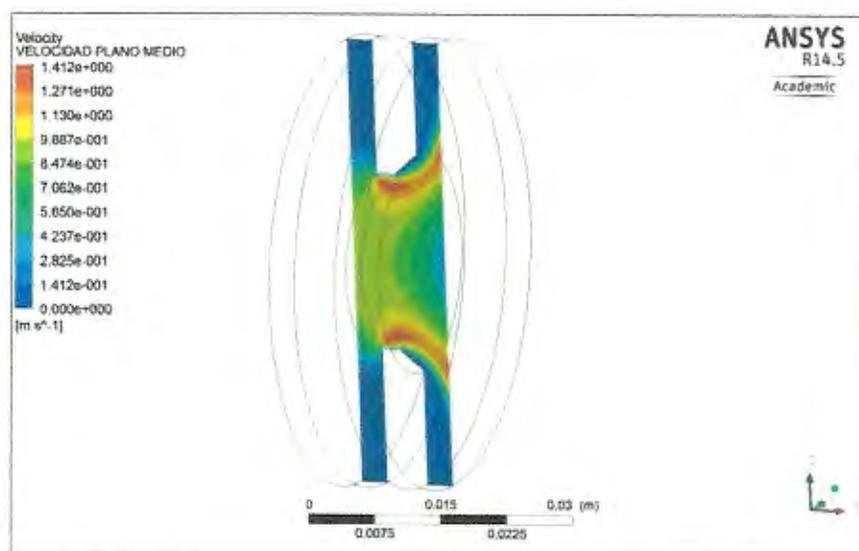
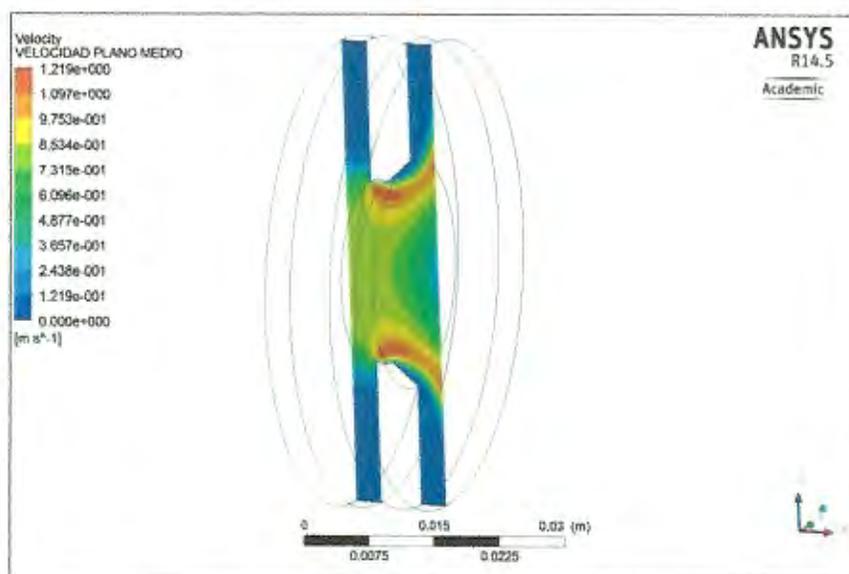


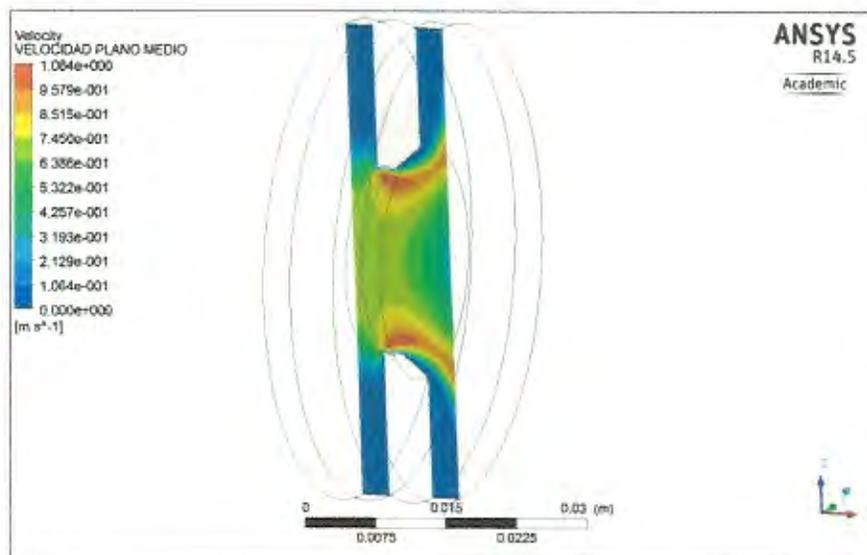
FIGURA 3.49 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 9638.25 (CUARTA SIMULACIÓN)



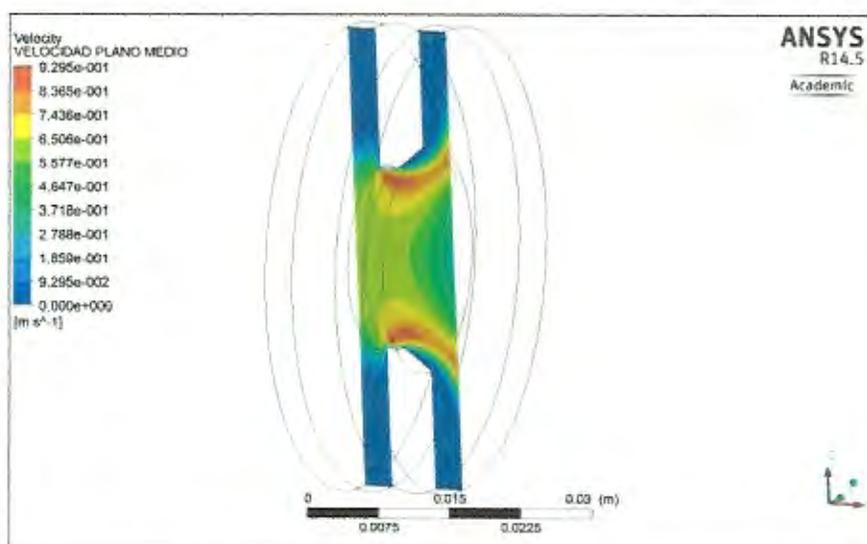
**FIGURA 3.50 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 8816.1 (QUINTA SIMULACIÓN)**



**FIGURA 3.51 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 7722.24 (SEXTA SIMULACIÓN)**



**FIGURA 3.52 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 6776.61 (SÉPTIMA SIMULACIÓN)**



**FIGURA 3.53 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 5940.65 (OCTAVA SIMULACIÓN)**

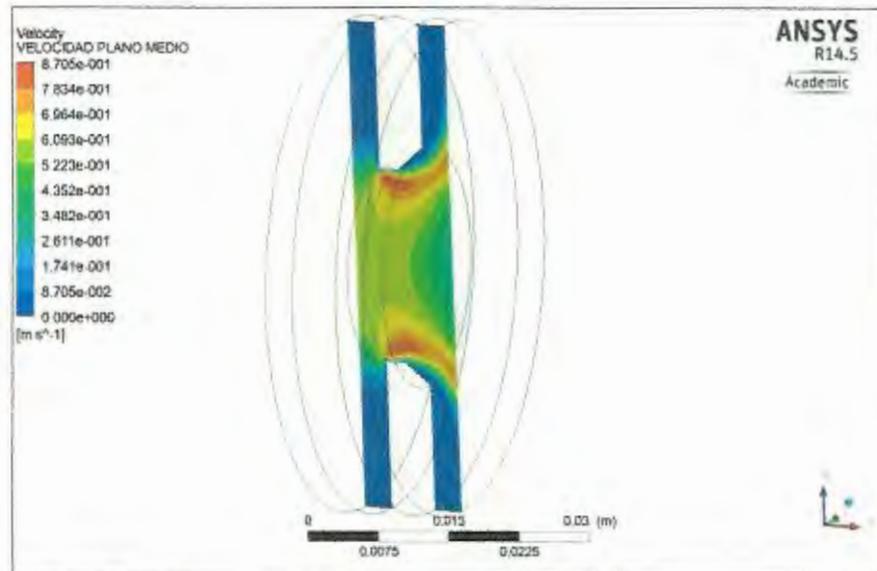
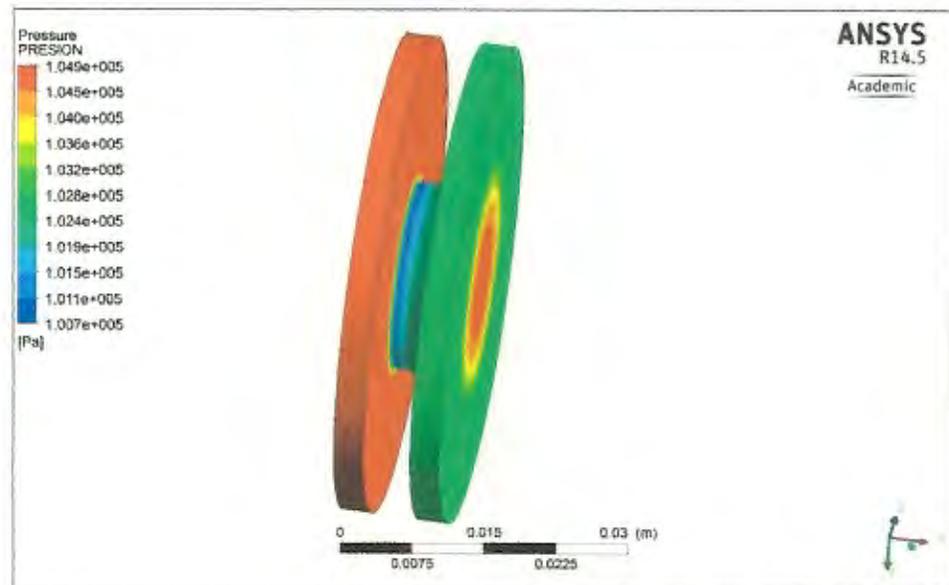


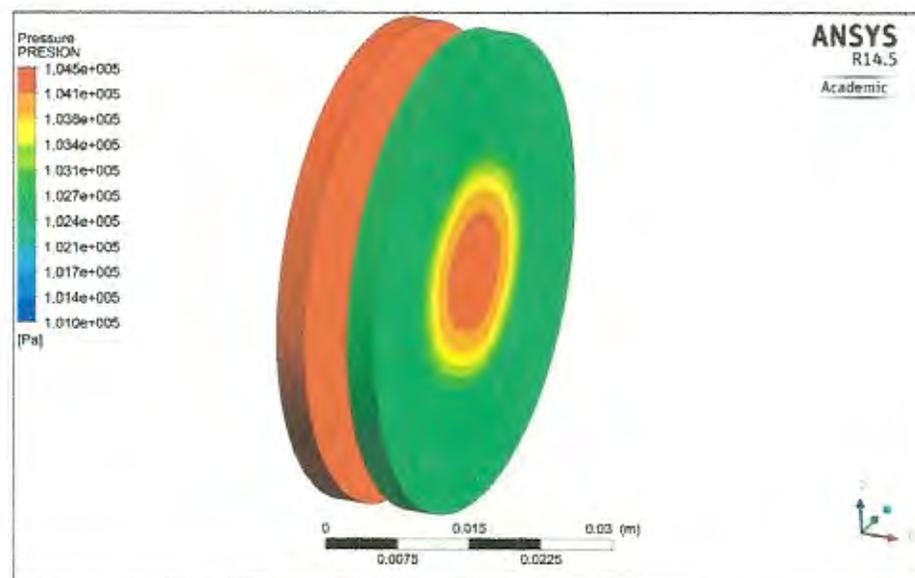
FIGURA 3.54 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE. 5578.23 (NOVENA SIMULACIÓN)

3.4.2.2 Contornos de presión

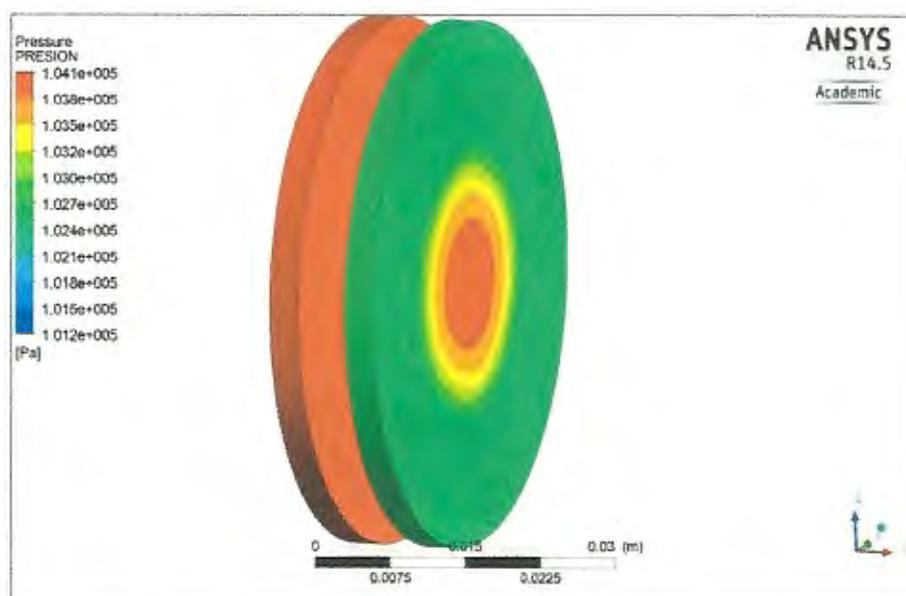
A continuación se grafican los contornos de presión para las nuevas simulaciones. Existirán dos tipos de contornos, un contorno que muestra la presión en todo el volumen de control y otro contorno que muestra la presión en la mitad del volumen de control. El análisis se lo realizará en el capítulo 5.



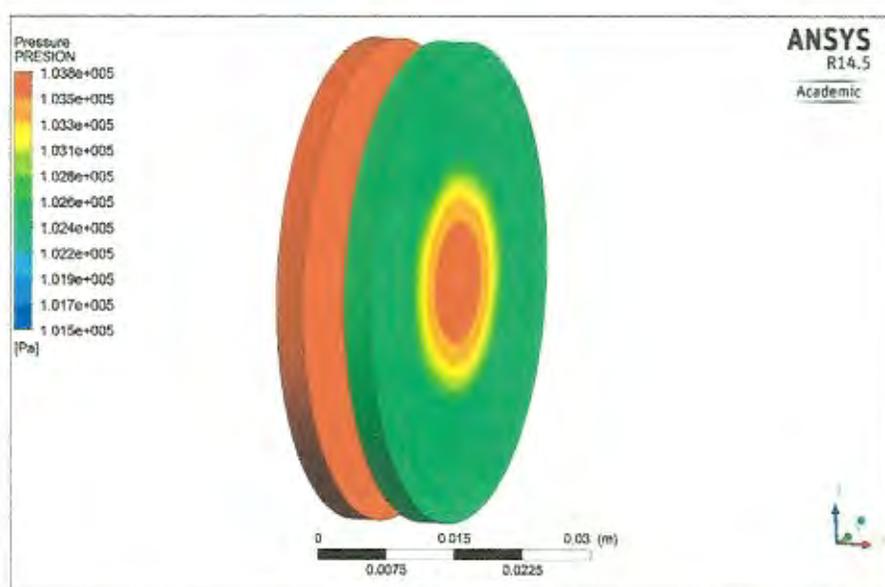
**FIGURA 3.55 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 12941.8 (PRIMERA SIMULACIÓN)**



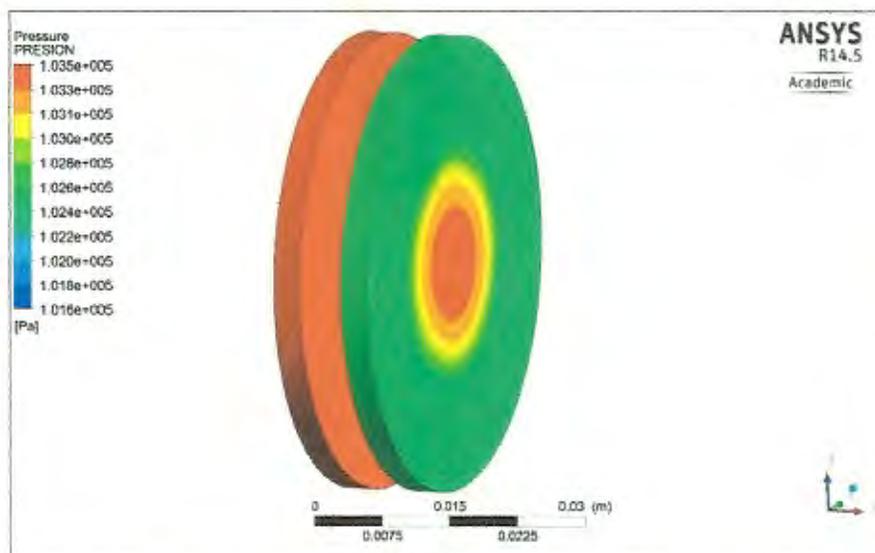
**FIGURA 3.56 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 11713.5 (SEGUNDA SIMULACIÓN)**



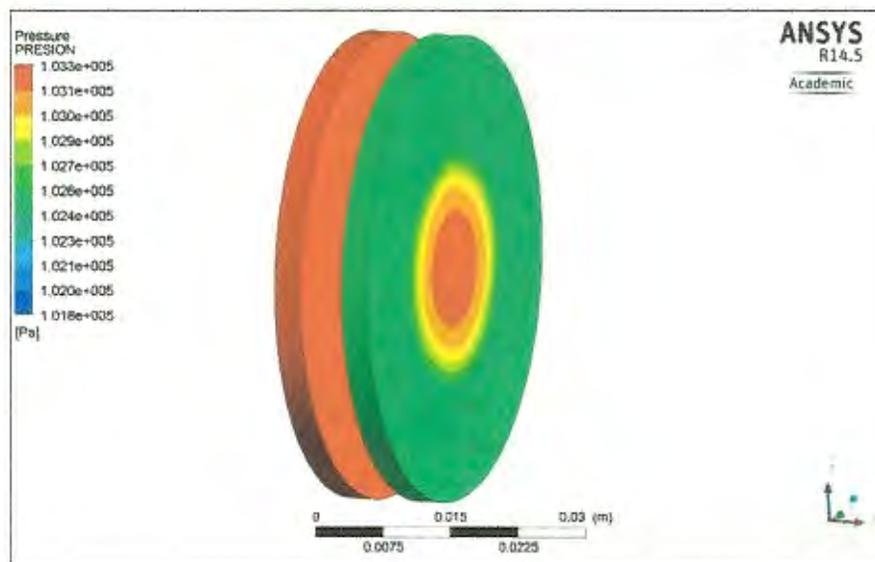
**FIGURA 3.57 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 10733.1 (TERCERA SIMULACIÓN)**



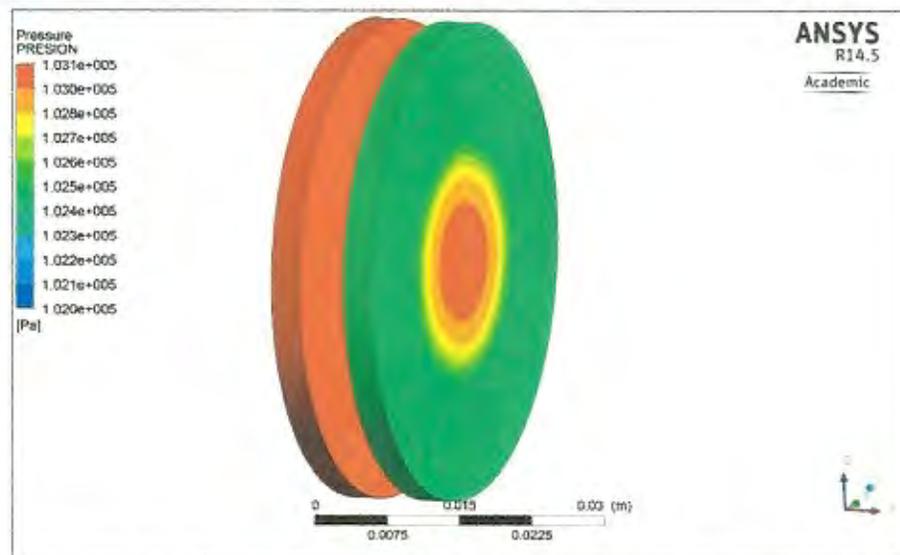
**FIGURA 3.58 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 9638.25 (CUARTA SIMULACIÓN)**



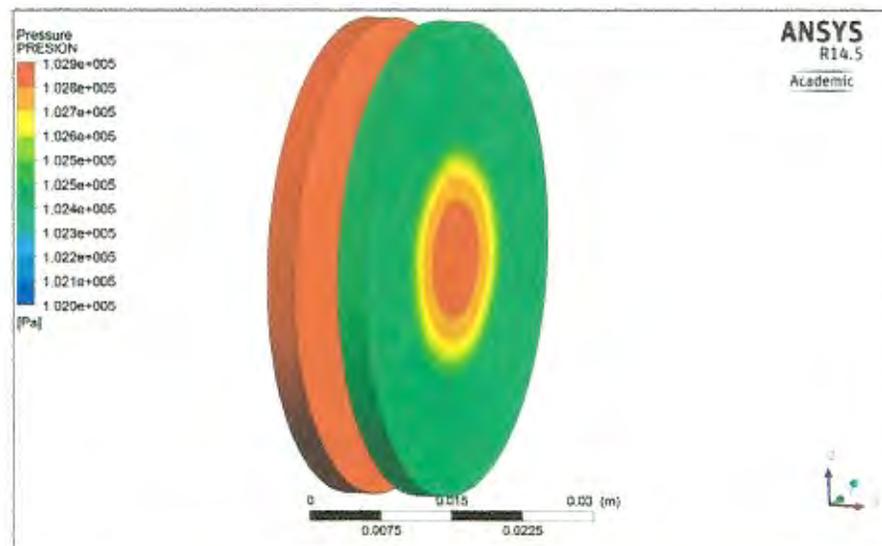
**FIGURA 3.59 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 8816.1 (QUINTA SIMULACIÓN)**



**FIGURA 3.60 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 7722.24 (SEXTA SIMULACIÓN)**



**FIGURA 3.61 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 6776.61 (SÉPTIMA SIMULACIÓN)**



**FIGURA 3.62 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO A RE: 5940.65 (OCTAVA SIMULACIÓN)**

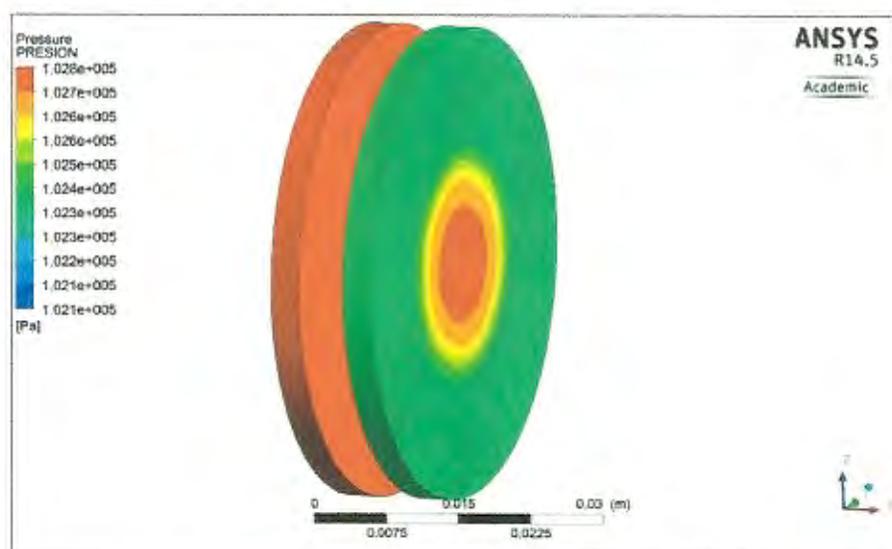


FIGURA 3.63 CONTORNO DE PRESIÓN DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 5578.23 (NOVENA SIMULACIÓN)

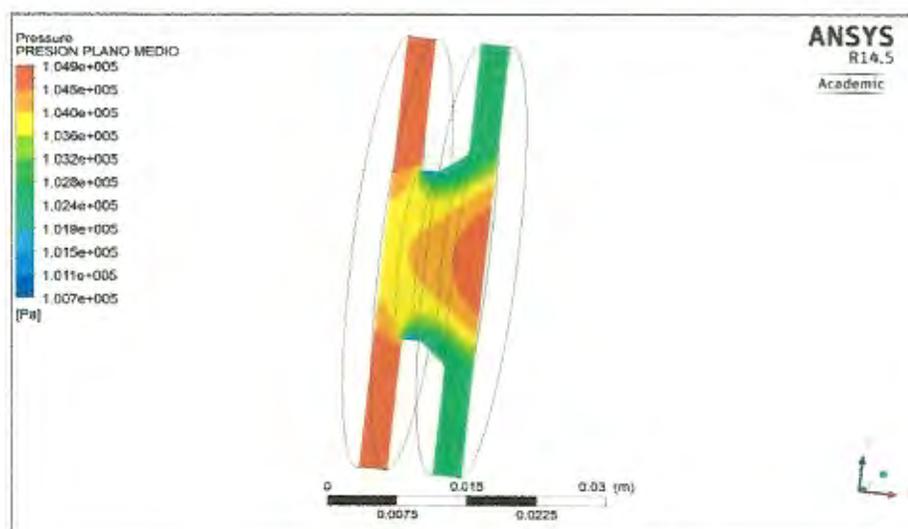


FIGURA 3.64 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 12941.8 (PRIMERA SIMULACIÓN)

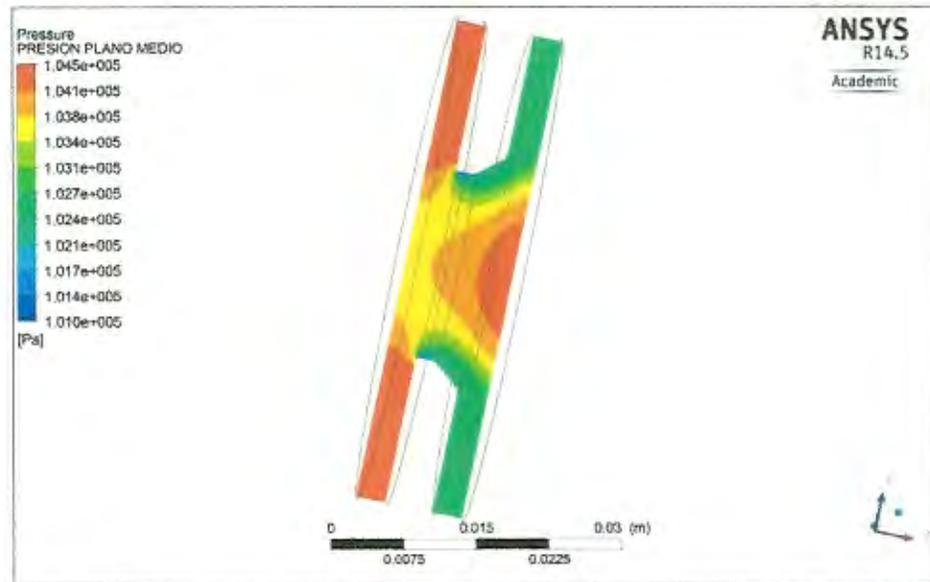


FIGURA 3.65 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 11713.5 (SEGUNDA SIMULACIÓN)

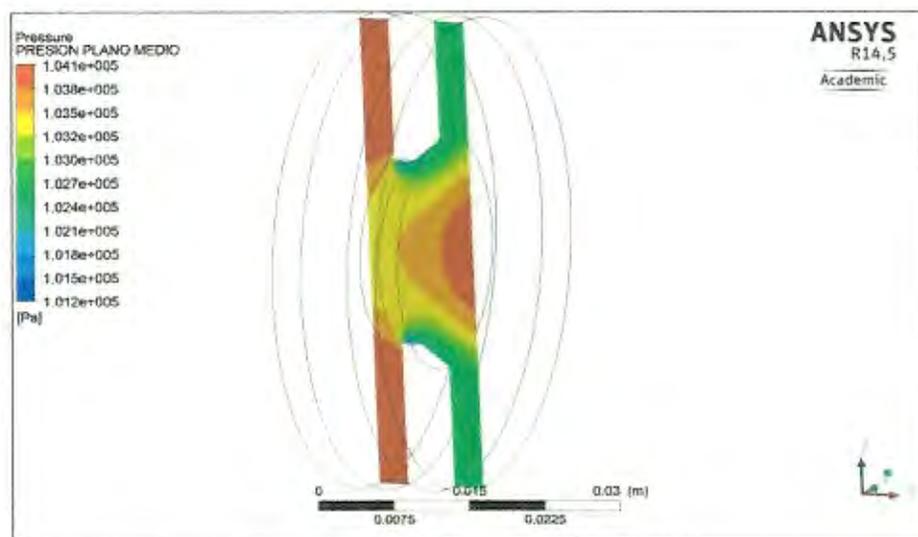


FIGURA 3.66 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 10733.1 (TERCERA SIMULACIÓN)

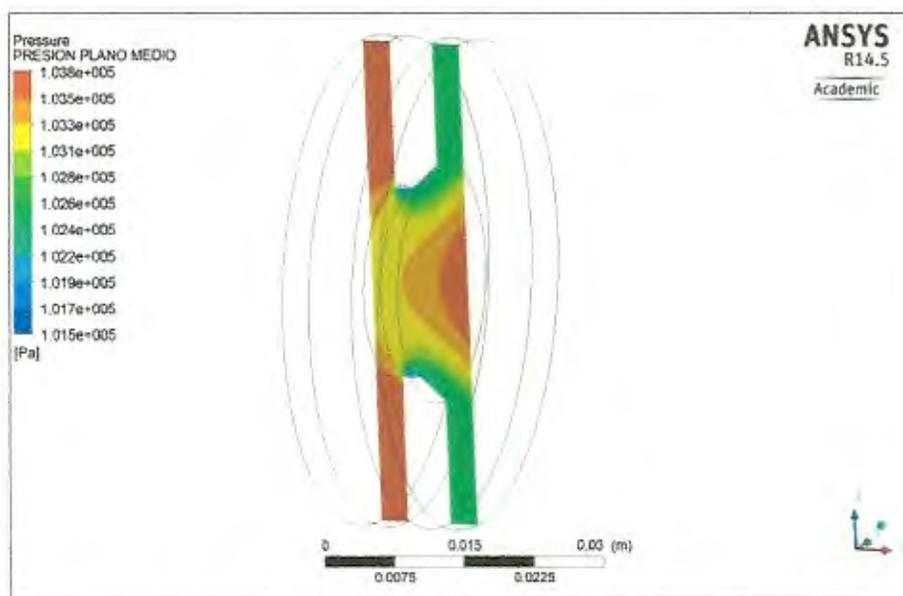


FIGURA 3.67 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 9638.25 (CUARTA SIMULACIÓN)

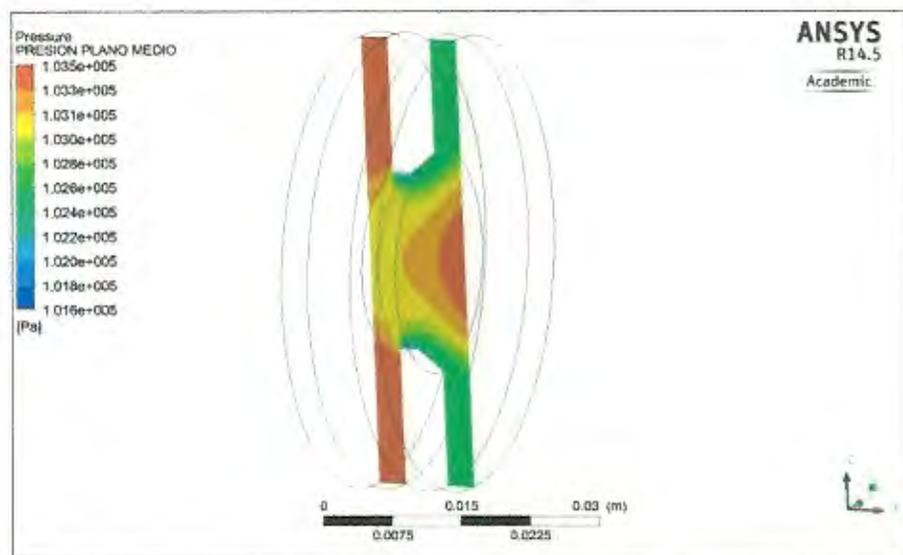


FIGURA 3.68 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 8816.1 (QUINTA SIMULACIÓN)

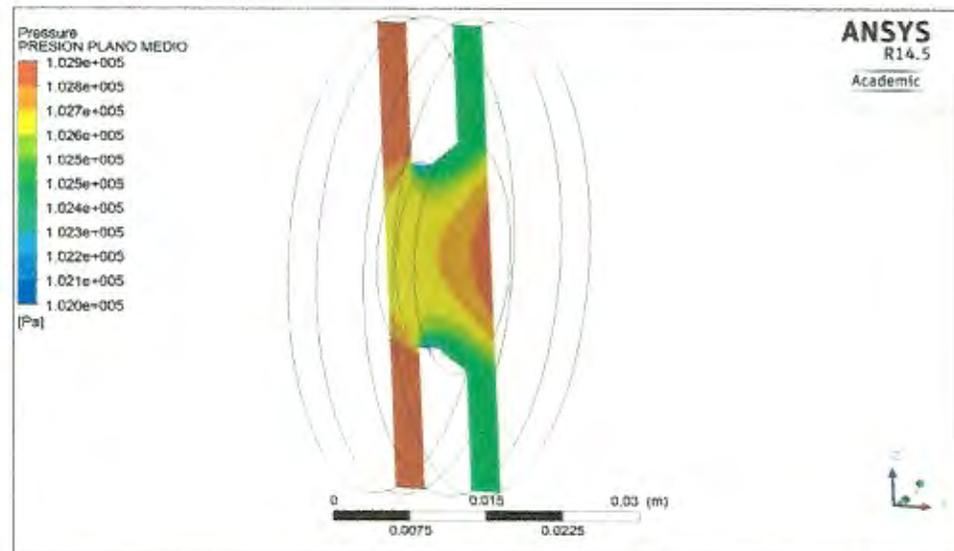


FIGURA 3.71 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 5940.65 (OCTAVA SIMULACIÓN)

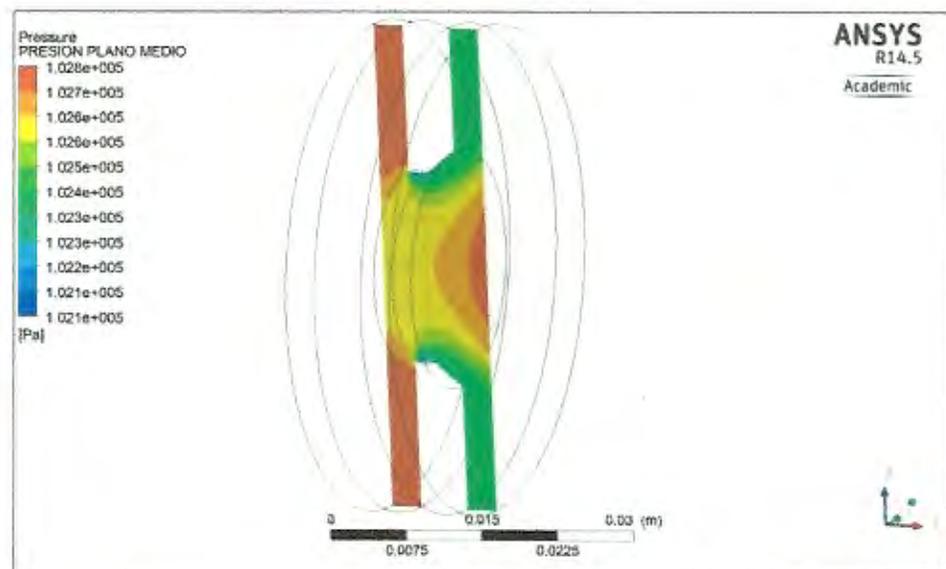


FIGURA 3.72 CONTORNO DE PRESIÓN-PLANO MEDIO DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO A RE: 5578.23 (NOVENA SIMULACIÓN)

3.4.2.3 Comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.

Además de graficar contornos de presión y velocidad, el simulador también calculó el coeficiente de descarga y número de Reynolds para cada simulación. A continuación en la tabla 3.6 se muestran estos valores obtenidos.

TABLA 8
RESULTADOS OBTENIDOS DE COEFICIENTE DE
DESCARGA Y NÚMERO DE REYNOLDS DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO

Simulación	Re	C _d
1	12941.8	0.7270
2	11713.5	0.7014
3	10733.1	0.6921
4	9638.25	0.6752
5	8816.1	0.6595
6	7722.24	0.6331
7	6776.61	0.6017
8	5940.65	0.5962
9	5578.23	0.5791

A continuación se muestra en la figura 3.73 el polinomio de regresión que mejor se ajusta a los valores obtenidos en la tabla

3.6. El programa para encontrar el polinomio de regresión y graficar estos valores, se muestran en el Apéndice C.

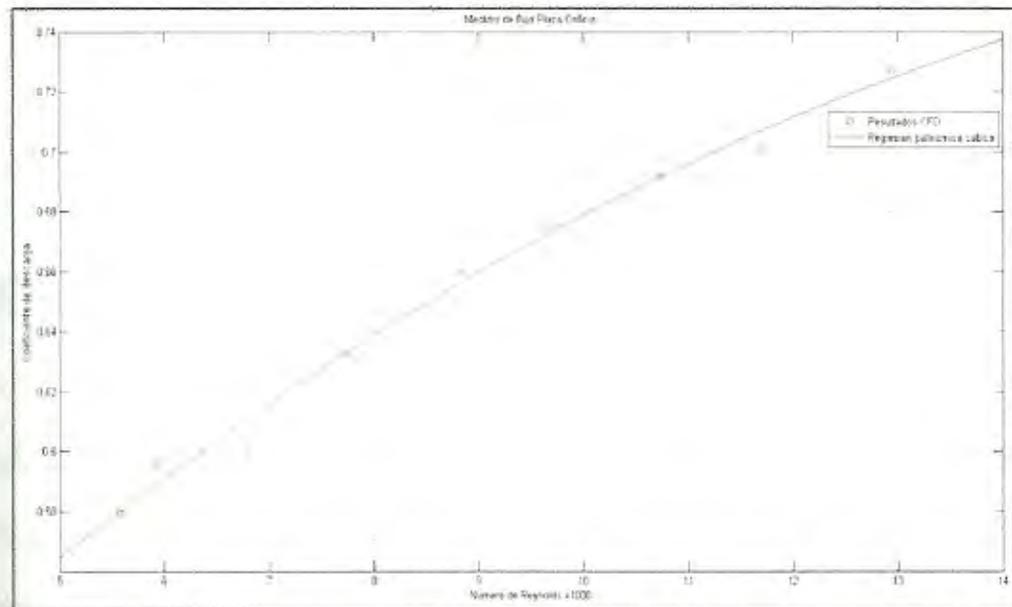


FIGURA 3.73 GRAFICO COEFICIENTE DE DESCARGA VS NÚMERO DE REYNOLDS OBTENIDOS MEDIANTE CFD

La ecuación obtenida mediante el software Matlab es:

$$C_d = 7.932 \times 10^{-6} Re^3 - 0.00115 Re^2 + 0.03865 Re + 0.399 \quad \text{Ec. 3.2}$$

El análisis de estos datos obtenidos y de la figura 3.73 se realizará en el capítulo 5.

CAPÍTULO 4

4. MODELO FÍSICO

Esta sección explicará el modelo físico del experimento, el cual consiste en un banco de prueba y equipos de medición que se utilizaron en el desarrollo del experimento. A continuación se explica detalladamente cómo está compuesto el modelo físico.

4.1 Banco de Prueba

El Banco de prueba está compuesto por dos equipos llamados TecQuipment H1 (Banco Hidráulico Gravimétrico) y TecQuipment H10 (Banco Medidor de Flujo). El Banco Hidráulico gravimétrico (TecQuipment Gravimetric Hydraulic¹⁴) suministra un flujo controlado de agua a varios equipos de laboratorio.

¹⁴ Datasheet TecQuipment H1

El banco hidráulico gravimétrico (figura 4.1) consta con un tanque sumidero con una bomba sumergible, un sistema de pesaje gravimétrico y una superficie de trabajo donde se colocan los otros equipos de laboratorio. Todas sus partes son hechas de materiales resistentes a la corrosión y debido a la facilidad que posee el flujo de salir del sumidero es utilizado en una gran variedad de experimento.

La parte superior del tanque proporciona la superficie de trabajo, en el que muchos de los experimentos de mecánica de fluidos es conveniente montarlos sobre esta superficie. Un reborde alrededor de la superficie de trabajo contiene el agua que se derrama por algún tipo de problema, ya sea por algún tipo de fuga o exceso de agua en el circuito hidráulico. En experimentos que usan equipos más grandes, se lo coloca a lado del banco hidráulico. Además posee una válvula que controla el flujo de agua hacia los diferentes equipos, esta válvula se encuentra en la parte inferior de la superficie de trabajo.

El sistema de pesaje gravimétrico consiste en un pequeño tanque interior en un brazo de pivote, que es equilibrado por

unos pesos y que además poseen una relación de distancia respecto al pivote de 1:3 respectivamente. Para medir el flujo de agua, los usuarios usan un cronómetro que empieza a medir el tiempo desde el momento en que el brazo de pivote del tanque interior se encuentra en su posición horizontal; y el cronómetro se detiene cuando este se levanta. Esto muestra que el peso del agua que se encuentra en el tanque interior es mayor al peso que se colocan al otro extremo del brazo.



FIGURA 4.1 BANCO HIDRÁULICO GRAVIMÉTRICO (TECQUIPMENT H1) SUMINISTRANDO FLUJO A UN EQUIPO EXPERIMENTAL¹⁵.

Los servicios esenciales y condiciones de operación que necesita el equipo para un correcto funcionamiento son:

¹⁵ Datasheet TecEquipment H1

- ✓ Rango de temperatura de ambiente del laboratorio (-25°C a 55°C).
- ✓ Rango de temperatura del fluido (5°C a 40°C).
- ✓ Conexión a tierra.
- ✓ Corriente Monofásica 220 VAC a 240 VAC, 50 Hz
- ✓ Espacio que necesita 2.5m x 1.5m

Las especificaciones del equipo son:

- ✓ Dimensiones: 1200mm x 760mm x 1100mm
- ✓ Capacidad tanque sumidero: 160 litros
- ✓ Capacidad de tanque interior: 40 litros
- ✓ Pesos externos/cantidad 6 : 2kg cada uno
- ✓ Capacidad de la bomba sumergible: 0 a 60 lts/min a 1.5m de cabezal

En la figura 4.2 se muestra la placa técnica del banco hidráulico gravimétrico que el laboratorio de termofluidos de la FIMCP-ESPOL le ha colocado, mostrando en ella su serie, el nombre del equipo, el modelo y el código ESPOL.



FIGURA 4.2 PLACA TÉCNICA DEL BANCO HIDRÁULICO GRAVIMÉTRICO

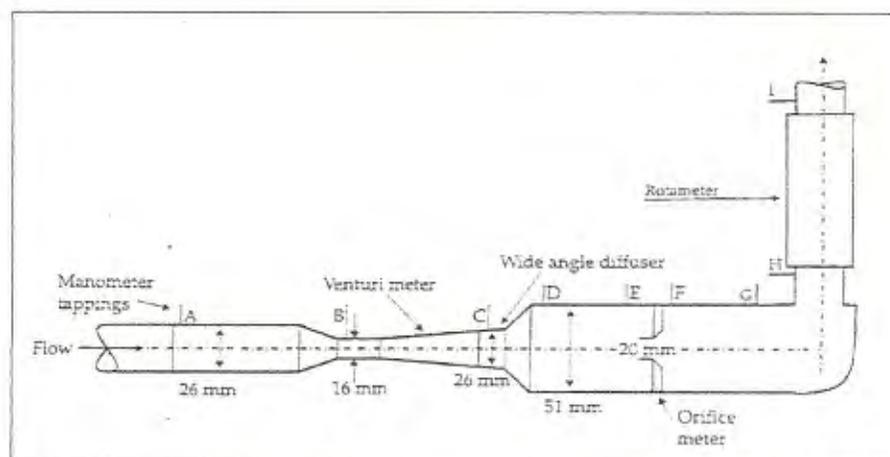
Para la determinación del caudal en forma teórica y experimental y el correspondiente coeficiente de descarga empírico se empleará un equipo en forma de tablero (*TecQuipment H10*) provisto de los dispositivos de medición: tubo Venturi, difusor, placa orificio (manufacturada en conformidad con BSI042), codo de 90 grados y rotámetro, montados en ese mismo orden tal como se indica en la figura 4.3; cuya geometría y diámetros correspondientes se encuentran en un esquema dibujado en el tablero del equipo (figura 4.4).



FIGURA 4.3 TECQUIPMENT H10 (BANCO MEDIDOR DE FLUJO)

Como puede observarse en la figura 4.3, el equipo de medición posee un juego de piezómetros cuyos orificios para toma de presión permiten obtener directamente la caída de presión a través de cada medidor, incluyendo la ganancia de presión en el difusor.

En la práctica, tomando como referencia la escala de capacidad del rotámetro se procederá a variar el caudal de agua de tal manera que puedan tomarse las lecturas piezométricas suficientes, con el objeto de conocer el orden de magnitud del coeficiente de descarga para cada medidor y hallar el modelo matemático que describe el comportamiento de este coeficiente con respecto al número de Reynolds.



**FIGURA 4.4 DIAGRAMA DEL BANCO MEDIDOR DE FLUJO
(TECQUIPMENT H10) ¹⁶**

Las condiciones de operación del Banco Medidor de Flujo son:

- ✓ Rango de temperatura de ambiente del laboratorio (-25°C a 55°C).
- ✓ Rango de temperatura del fluido (5°C a 40°C).
- ✓ Rango de humedad relativa 80% a temperaturas < 31°C decreciendo linealmente a 50% a 40°C.

Las especificaciones¹⁶ del Banco Medidor de Flujo son:

- ✓ Dimensiones: 900mm x 380mm x 900mm.
- ✓ Peso del equipo: 19 Kg.
- ✓ Placa orificio: Diámetro de 20mm, manufacturado en base a B.S. 1042.

¹⁶ Datasheet TecQuipment H10

- ✓ Ensanchamiento brusco: 26mm a 51mm
- ✓ Rotámetro: Escala 0 a 210mm. Incluye tabla de calibración para 0 a 35 lts/min.
- ✓ Manómetro: Escala 0 a 380mm.
- ✓ Flujo máximo: 28 lts/min.

En la figura 4.5 se muestra la placa técnica del Banco Medidor de Flujo que el laboratorio de termofluidos de la FIMCP-ESPOL le ha colocado, mostrando en ella su número de unidad, el nombre del equipo y el número de tipo.



FIGURA 4.5 PLACA TÉCNICA DEL BANCO MEDIDOR DE FLUJO (TECQUIPMENT H10)

4.2 Equipos de medición

Para realizar la tomas de mediciones se usaron varios equipos de medición, entre digitales y analógicos. A continuación se explica

detalladamente los equipos que se utilizaron para el desarrollo del experimento.

4.2.1 Medidor de Temperatura

Para medir la temperatura del agua, se utilizó un termómetro infrarrojo. Los termómetros infrarrojos o también conocidos como termómetros sin contacto haciendo referencia a la capacidad del dispositivo para medir la temperatura a distancia y sin tocar el objeto físicamente. Al conocer la cantidad de energía infrarroja emitida por el objeto y su emisividad, la temperatura del objeto puede ser determinada.

Normalmente el aparato consta de una lente que permite captar la emisividad infrarroja del objeto. La lente capta la cantidad de energía infrarroja que emite el objeto y la pasa a un complejo sistema que traduce la energía captada en señal eléctrica, la cual se traduce numéricamente en temperatura en la pantalla del termómetro. Si el termómetro es de una mínima calidad, el aparato compensa con la temperatura ambiente la cantidad de energía infrarroja captada para evitar errores en las mediciones¹⁷.

El termómetro infrarrojo que se utilizó para el desarrollo del experimento, es de marca CEN-TECH (figura 4.6), sus características y especificaciones se detallan en la tabla 9 y tabla 10 respectivamente.

TABLA 9
CARACTERÍSTICAS DE TERMÓMETRO INFRARROJO

Nombre	INFRARED THERMOMETER
Marca	CEN-TECH
Serial	364381240

TABLA 10
ESPECIFICACIONES DE TERMÓMETRO INFRARROJO

Relación punto de medición/distancia	100:1
Rango de medición	Infrarrojo: +100...+1800°C Termoelemento tipo K: -64...+1370°C Resolución pantalla: 0.1°C (a partir de 1000°C: 1°C)
Precisión	Infrarrojo: $\pm 2\%$ o 2°C, valido el valor superior. Termoelemento: $\pm 1\%$ o 1°C, valido el valor superior.
Temperatura operativa	0...+50°C
Duración de batería	40 horas en funcionamiento continuo
Batería	2 x 1.5V AAA
Peso	1350g
Funciones	grado de emisión ajustable 0.10...1.00, selección °C/°F, puntero laser, iluminación de fondo, alarma de valores limites, entrada tipo K.



**FIGURA 4.6 TERMÓMETRO INFRARROJO MARCA
CEN-TECH**

4.2.2 Manómetro Multitubular

El Manómetro Multitubular (figura 4.7) es una herramienta que sirve para medir la presión indirectamente sobre una sección en particular. Para el experimento se colocan unos orificios antes y después de cada medidor de flujo para con ello conocer la caída de presión que producen. Se mantiene presurizado el sistema mediante una bomba de aire manual (figura 4.8), teniendo en cuenta también que no debe existir burbujas de aire dentro de sus mangueras que puedan llegar a causar una lectura errónea. Su resolución es de 1mm y se encuentra montado en el banco de prueba.



FIGURA 4.7 MANÓMETRO MULTITUBULAR



FIGURA 4.8 BOMBA DE AIRE MANUAL

4.2.3 Cronómetro

El Cronómetro es un equipo de medición que ayudó a controlar el tiempo que tarda el brazo de pivote del banco gravimétrico en

levantarse, y comienza a medirse desde el momento en que el usuario cierre la válvula de paso de agua del tanque interior al sumidero. El cronómetro que se utilizó para el desarrollo del experimento posee una resolución de 0.01 segundo.

4.3 Metodología de medición

La metodología o proceso de medición que se realizó es el siguiente:

1. Verificar que la válvula de alimentación del banco hidráulico y la válvula de control (descarga), estén cerradas.
2. Abrir la válvula de control 1/3 de su apertura total (aproximadamente dos vueltas) y encender la bomba de alimentación del banco.
3. Abrir totalmente y en forma lenta la válvula de alimentación del banco; cuando el equipo esté lleno de agua y libre de burbujas de aire, cerrar totalmente la válvula de control de manera que el flotador del rotámetro descienda al tope inferior del tubo cónico.
4. Retirar la tapa del gusanillo que se encuentra en el extremo del tubo múltiple de vidrio, conecte la bomba manual de aire e introduzca el aire hasta que la altura de los piezómetros alcance 280 mm. en la escala del tablero.

5. Abrir la válvula de control de manera que el flotador del rotámetro se ubique en la primera altura indicada en la tabla de datos (22.5cm), proceder a medir las alturas de los piezómetros de los medidores: Venturi, y placa orificio.
6. Cerrar la válvula de paso de agua del tanque interior al sumidero y tomar el tiempo que tarda el brazo de pivote en levantarse. Para este experimento se utilizó solamente la pesa que viene soldada a la varilla que está sujeta al brazo, su peso es de 2.7 Kg.
7. Determinar el caudal real del banco hidráulico gravimétrico mediante el tiempo medido y el peso del agua del tanque interior (para este experimento es 8.1 kg).
8. Para obtener las demás alturas indicadas en la tabla de datos (tabla 4.3), cierre gradualmente la válvula de control hasta que el flotador del rotámetro se ubique en la posición correspondiente y repita el paso 6 y 7.
9. Finalizada la toma de datos apague el equipo de acuerdo a las instrucciones del Técnico del Laboratorio.

4.4 Resultados de medición

Las mediciones fueron realizadas en el Laboratorio de Termofluidos de la FIMCP-ESPOL, en el cual se usaron los bancos de prueba

Medidores de Flujo (TecQuipment H10) y Banco hidráulico gravimétrico (TecQuipment H1).

4.4.1 Resultado Venturi

Las mediciones que se obtuvieron en este experimento fueron realizadas tomando como referencia la posición del flotador en el rotámetro. A continuación se muestra las mediciones obtenidas en el experimento (tabla 4.3). El esquema hidráulico que es de referencia para el estudio se muestra en la figura 4.9.

TABLA 11
TABLA DE MEDICIONES OBTENIDAS EN EL MEDIDOR
TUBO VENTURI

Prueba	Altura rotámetro (cm)	h_a (mm)	h_b (mm)	masa H_2O (kg)	t (s)
1	22.5	378	114	8.1	16.55
2	20.6	335	114	8.1	18.3
3	18.8	291	108	8.1	19.97
4	17.4	265	104	8.1	22.23
5	15.5	233	100	8.1	24.3
6	14.1	208	97	8.1	27.74
7	12.5	184	94	8.1	31.62
8	10.7	162	93	8.1	36.07
9	9.6	150	90	8.1	38.41

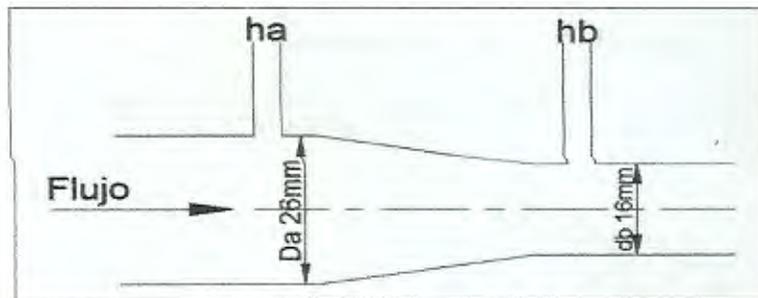


FIGURA 4.9 ESQUEMA DEL MEDIDOR TUBO VENTURI

4.4.1.1 Determinación del Coeficiente de Descarga

La demostración de la determinación del coeficiente de descarga en forma tradicional o manual, se lo realiza únicamente para la primera medición. Para el resto se mostrará detallado el Coeficiente de descarga en la tabla 4.5.

Partiendo de la ecuación 2.22:

$$C_d = \frac{Re v}{D \sqrt{\frac{2 \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right]}{\frac{1}{\beta^4} - 1}}}$$

Sabiendo que;

$$P_1 = \rho g h_a$$

$$P_2 = \rho g h_b$$

Y desarrollando el denominador dentro de la raíz tiene;

$$C_d = \frac{Re v}{D_a \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(h_a - h_b)}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde;

$$\beta = \frac{D_b}{D_a} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_r D_a}{v \rho A_a} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\dot{m}_r = \frac{m_{H_2O}}{t} = \text{flujo masico real} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$A_a = \frac{\pi D_a^2}{4} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Las distintas variables que forman parte de estas ecuaciones se muestran en la tabla 12

TABLA 12.
TABLA DE VARIABLES DEL COEFICIENTE DE
DESCARGA DEL MEDIDOR TUBO VENTURI

Temperatura del fluido	27°C
Viscosidad dinámica ν (T=27°C) ¹⁸	$9.441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Diámetro sección A (D_a)	0.026 m
Diámetro sección B (D_b)	0.016 m
Densidad del fluido (ρ)	1000Kg/m ³
Gravedad (g)	9.8 m/s ²

Escogiendo el dato de la prueba 1 de la tabla 4.3, se lo reemplaza en la ecuación 4.4.

$$\dot{m}_r = \frac{8.1 \text{ kg}}{16.55 \text{ s}} = 0.4894 \text{ kg/s}$$

Reemplazando los valores de la tabla 4.4 en las ecuaciones 4.5, 4.3, 4.2 y 4.1 tiene:

$$A_a = \frac{\pi 0.026^2}{4} = 5.31 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Re = \frac{(0.4894)(0.026)}{(9.441 \times 10^{-7})(1000)(5.31 \times 10^{-4})} = 25386.614$$

¹⁸ Mecánica de Fluidos. Frank M. White. Apéndice A. Tabla A.1

$$\beta = \frac{0.016}{0.026} = 0.615$$

$$C_d = \frac{(25386.61)(9.441 \times 10^{-7})}{(0.026)(0.615)^2} \sqrt{\frac{1 - 0.615^4}{2(9.8)(0.378 - 0.114)}}$$

$$C_d = 0.9904$$

En la tabla 13 se muestra los cálculos obtenidos para las demás mediciones realizadas.

TABLA 13
RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES
REALIZADAS EN EL MEDIDOR TUBO VENTURI

Prueba	Re	Cd
1	25386.6139	0,9904
2	22958.9323	0.9790
3	21038.9815	0.9858
4	18900.0657	0.9442
5	17290.0601	0.9503
6	15145.9431	0.9113
7	13287.4276	0.8879
8	11648.1414	0.8889
9	10938.5176	0.8952

4.4.1.2 Comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds.

En la figura 4.10 se muestra los resultados obtenidos de las mediciones realizadas al medidor tubo Venturi (tabla 4.5), a estos resultados se les realizó el análisis de propagación de errores, el cual se detalla en el Apéndice A.

Debido a que estos resultados son datos de dispersión, se realiza una regresión polinomial; mostrando de esta manera al polinomio que mayor se ajusta a los datos. En el apéndice B se detalla la realización de la regresión polinomial a los datos experimentales.

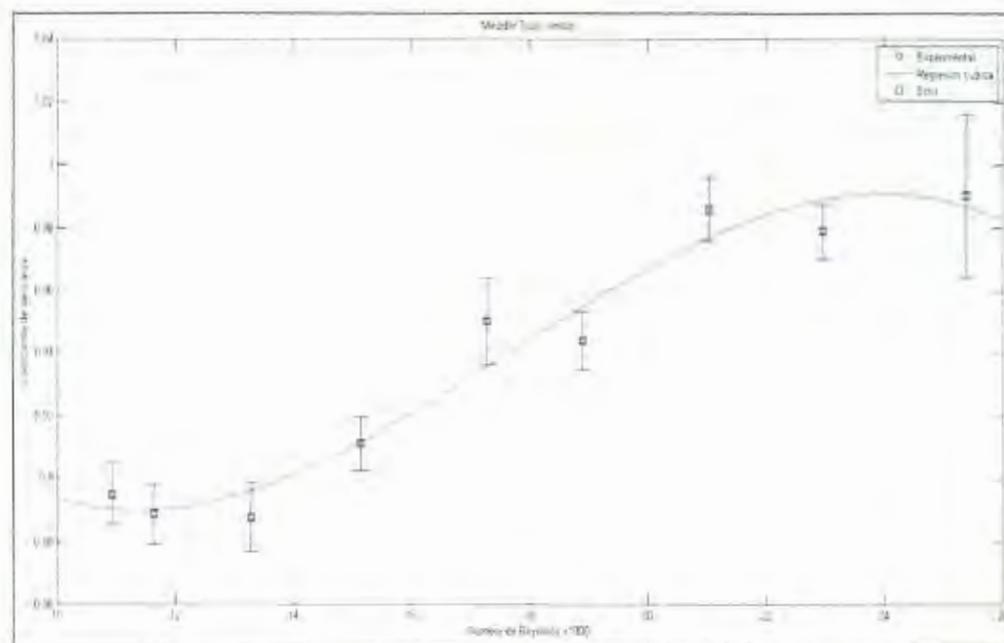


FIGURA 4.10 GRÁFICO DE DISPERSIÓN Y REGRESIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES DEL MEDIDOR VENTURI

La ecuación obtenida mediante el software Matlab es:

$$C_d = -0.0132Re^3 + 0.00218Re^2 + 0.0608Re + 0.9372 \text{ Ec. 4.6}$$

La ecuación 4.6 es la ecuación obtenida de la regresión polinomial, como se observa en la figura 4.10, el análisis de estos resultados se realizará en el Capítulo 5.

4.4.2 Resultado Placa orificio

Las mediciones que se obtuvieron en este experimento fueron realizadas tomando como referencia la posición del flotador en el rotámetro. A continuación se muestra las mediciones obtenidas en el experimento (tabla 4.6). El esquema hidráulico que es de referencia para este estudio se muestra en la figura 4.11.

TABLA 14
TABLA DE MEDICIONES OBTENIDAS EN EL
MEDIDOR PLACA ORIFICIO

Prueba	Altura rotámetro (cm)	h_e (mm)	h_f (mm)	Masa H_2O (kg)	t (s)
1	22.5	362	70	8.1	16.55
2	20.6	320	79	8.1	18.3
3	18.8	284	80	8.1	19.97
4	17.4	248	80	8.1	22.23
5	15.5	225	81	8.1	24.3
6	14.1	200	81	8.1	27.74
7	12.5	178	83	8.1	31.62
8	10.7	158	84	8.1	36.07
9	9.6	150	84	8.1	38.41

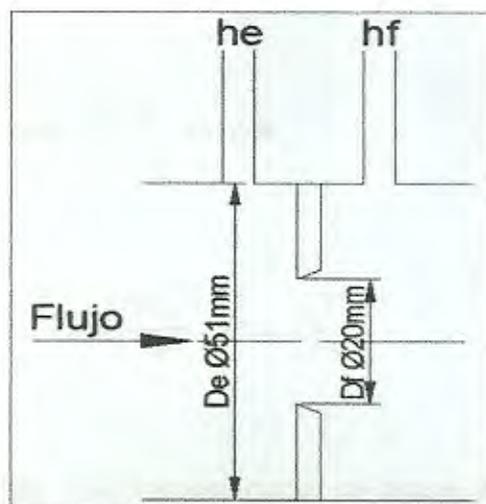


FIGURA 4.11 ESQUEMA DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

4.4.2.1 Determinación del Coeficiente de Descarga

La Placa Orificio y el Tubo Venturí se basan en el principio de Bernoulli, por esta razón las ecuaciones para determinar el coeficiente de descarga son iguales para ambos medidores, solo cambia los sufijos de las respectivas variables.

Obteniendo;

$$C_d = \frac{Re v}{D_e \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(h_e - h_f)}} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Donde;

$$\beta = \frac{D_f}{D_e} \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_r D_e}{v \rho A_e} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$A_e = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Las distintas variables que forman parte de estas ecuaciones se muestran en la tabla 4.7.

TABLA 15
TABLA DE VARIABLES DEL COEFICIENTE DE
DESCARGA DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

Temperatura del fluido	27°C
Viscosidad dinámica ν (T=27°C)	$9.441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Diámetro sección E (D_e)	0.051 m
Diámetro sección F (D_f)	0.02 m
Densidad del fluido (ρ)	1000Kg/m ³
Gravedad (g)	9.8 m/s ²

Escogiendo el dato de la prueba 1 de la tabla 4.6, se lo reemplaza en la ecuación 4.4.

$$\dot{m}_r = \frac{8.1 \text{ kg}}{16.55 \text{ s}} = 0.4894 \text{ kg/s}$$

Reemplazando los valores de la tabla 4.7 en las ecuaciones 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se tiene:

$$A_e = \frac{\pi 0.051^2}{4} = 2.04 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Re = \frac{(0.4894)(0.051)}{(9.441 \times 10^{-7})(1000)(2.04 \times 10^{-3})} = 12942.2$$

$$\beta = \frac{0.02}{0.051} = 0.3922$$

$$C_d = \frac{(12942.2)(9.441 \times 10^{-7})}{(0.051)(0.3922)^2} \sqrt{\frac{1 - 0.3922^4}{2(9.8)(0.362 - 0.070)}}$$

$$C_d = 0.6435$$

En la tabla 16 se muestra los cálculos obtenidos para las demás mediciones realizadas.

TABLA 16
RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES
REALIZADAS EN EL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

Prueba	Re	Cd
1	12942.1953	0.6435
2	11704.5537	0.6405
3	10725.7553	0.6380
4	9635.32761	0.6316
5	8814.54044	0.6241
6	7721.46116	0.6014
7	6773.98269	0.5905
8	5938.26816	0.5865
9	5576.49916	0.5832

4.4.2.2 Comportamiento del Coeficiente de Descarga a Diferente Número de Reynolds.

En la figura 4.12 se muestra los resultados obtenidos de las mediciones realizadas al medidor Placa Orificio (tabla 4.8), a estos resultados se les realizó el análisis de propagación de errores, el cual se detalla en el Apéndice A.

Debido a que estos resultados son datos de dispersión, se realiza una regresión polinomial, mostrando de esta manera al polinomio que mayor se ajusta a los datos. En el apéndice B se detalla la realización de la regresión polinomial a los datos experimentales.

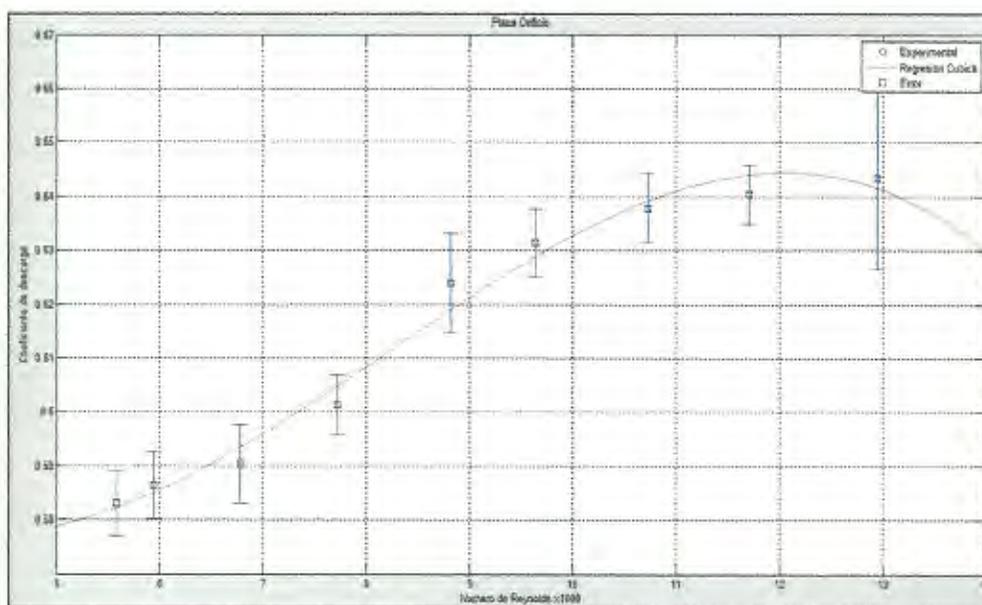


FIGURA 4.12 GRÁFICO DE DISPERSIÓN Y REGRESIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

La ecuación obtenida mediante el software Matlab es:

$$C_d = -2.91 \times 10^{-4} Re^3 + 0.0072 Re^2 - 0.0457 Re + 0.665 \quad \text{Ec. 4.11}$$

La ecuación 4.11 es la ecuación obtenida de la regresión polinomial, como se observa en la figura 4.12, el análisis de estos resultados se realizará en el Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo se trata sobre el análisis de los resultados obtenidos del modelo CFD y del modelo experimental, y a su vez realizar la comparación respectiva entre ambos modelos para obtener las conclusiones que sean necesarias para validar los objetivos planteados en el capítulo 1.

5.1 Análisis de Resultados CFD

El análisis de resultados CFD consiste en analizar las gráficas de contorno de presión y velocidad obtenidas en el capítulo 3 mediante el uso del software ANSYS-CFX 14.5. A su vez se obtiene del software ANSYS-CFX 14.5 valores que simulan el comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds, estos valores se muestran gráficamente en el capítulo 3 y su análisis respectivo se desarrollará en esta sección.

5.1.1 Análisis CFD Venturi

El análisis CFD Venturi tratará de explicar de manera cualitativa los valores que se muestran en las gráficas de contornos de velocidad, contornos de presión y de la gráfica que simula el comportamiento del coeficiente de descarga a distinto número de Reynolds del medidor Venturi. Todas estas gráficas se muestran en el capítulo 3.

5.1.1.1 Análisis del contorno de velocidad

Si se observa la figura 5.1, muestra los contornos de la magnitud de la velocidad de las pruebas 1, 5 y 9 realizadas al medidor de flujo Venturi a distintos número de Reynolds. En ella se nota que la velocidad del fluido no es uniforme, sino que su velocidad es nula en las proximidades de las paredes del tubo y máxima en la parte central del volumen del fluido. La simulación muestra de esta manera un correcto comportamiento de la velocidad, debido a que es lo esperado teóricamente.

Cabe recalcar que externamente la diferencia del comportamiento de la velocidad del fluido a distinto número de Reynolds es mínima, por lo que el análisis más exhaustivo se realiza a la figura 5.2.

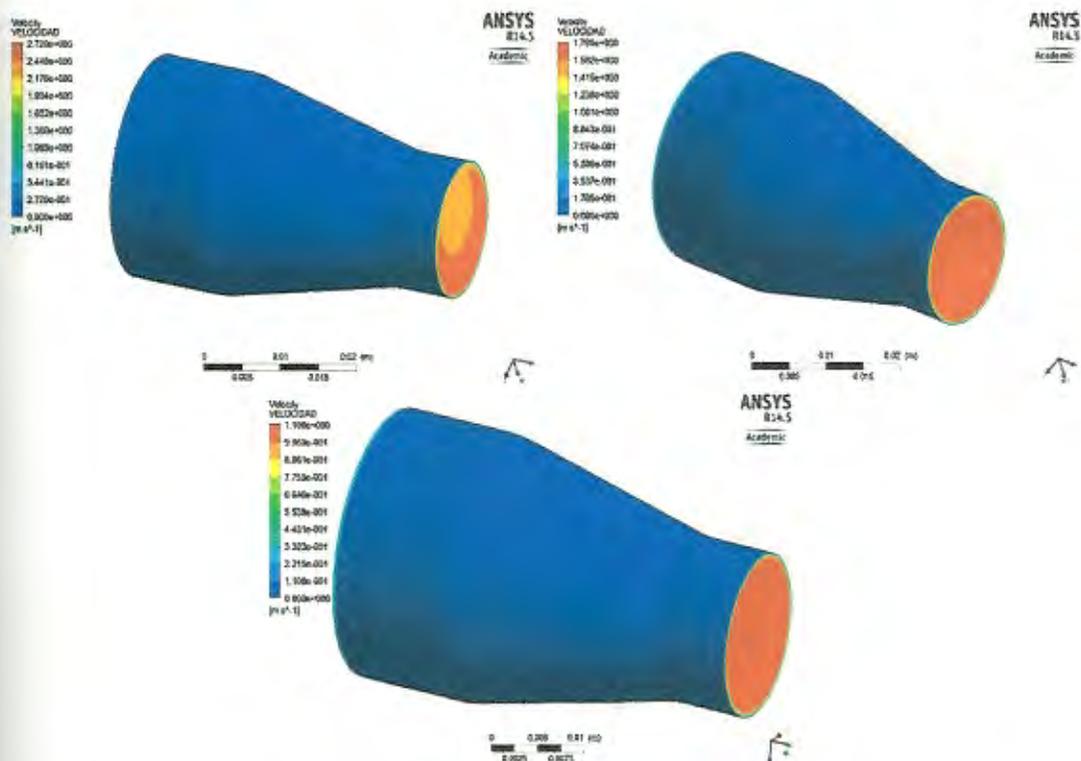


FIGURA 5.1 CONTORNOS DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI

La figura 5.2 corresponde a los contornos de la magnitud de la velocidad en un plano que atraviesa al volumen del fluido por la mitad, de esta forma entenderá de mejor manera el comportamiento de la velocidad a través de todo el volumen de control.

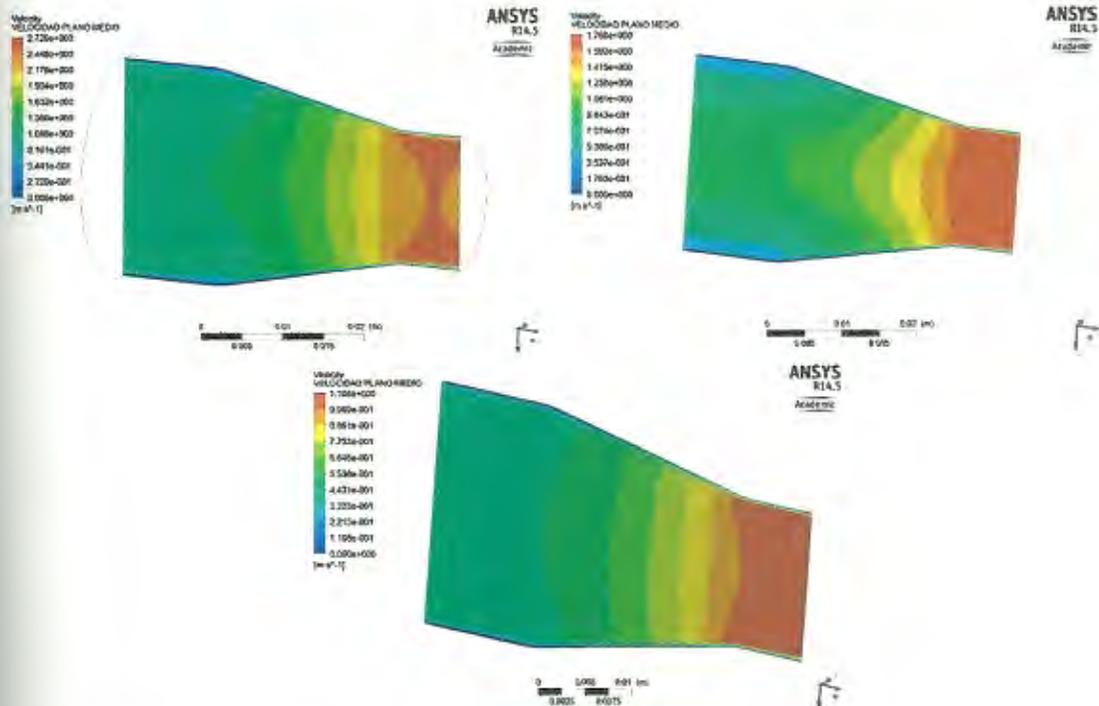


FIGURA 5.2 CONTORNOS DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI EN UN PLANO QUE ATRAVIESA POR LA MITAD AL VOLUMEN DE CONTROL

En esta figura se observa que la velocidad del fluido varía longitudinalmente, donde la velocidad que adquiere el fluido a la entrada es de magnitud baja y se va acelerando mientras se va acercando a la zona de convergencia. Esto es lógico debido a que el fluido mientras se acerca a la zona de convergencia experimenta una caída de presión, ocasionando que las más altas velocidades existan a la salida del medidor.

Además si se observan los 3 gráficos; se da cuenta que la velocidad en el sentido transversal también varía cuando se varia el flujo másico. Este cambio se lo visualiza más claro a la entrada debido a que todas las pruebas se hicieron de régimen turbulento. En esta sección a un bajo flujo másico la velocidad es prácticamente uniforme (solo en la paredes es nula), pero mientras si aumenta el flujo másico la velocidad ya no es uniforme; sino que la velocidad en el centro empieza ser mayor hasta el punto de tener tres zonas distintas de velocidad. Esto se debe principalmente al efecto que tiene las paredes del medidor de flujo en su zona convergente; donde el flujo impacta directamente sobre las paredes provocando una recirculación del mismo, es por esta razón que en ciertas pruebas se nota tres zonas de velocidad; donde dos son bajas respecto al centro. Al seguir aumentando el flujo másico este efecto desaparece, regresando a ser su velocidad prácticamente uniforme.

5.1.1.2 Análisis del Contorno de presión

La figura 5.3 representa a los contornos de la presión que experimenta el fluido en el interior del medidor de flujo tubo Venturi. Allí se observa que la presión a la entrada es mayor que a la salida del medidor de flujo Venturi. Esto se debe a que la zona de convergencia del medidor de flujo causa una reducción en la

presión del fluido al atravesar completamente el medidor de flujo. Además se observa que la presión no es uniforme en forma transversal, este fenómeno sucede a la salida del medidor donde el fluido toma el cambio de dirección. Este fenómeno es más visible a un mayor flujo másico, pero no interfiere en el cálculo del coeficiente de descarga. La figura 5.3 muestra el comportamiento de la presión del fluido a distintos números de Reynolds (Pruebas 1, 5 y 9).

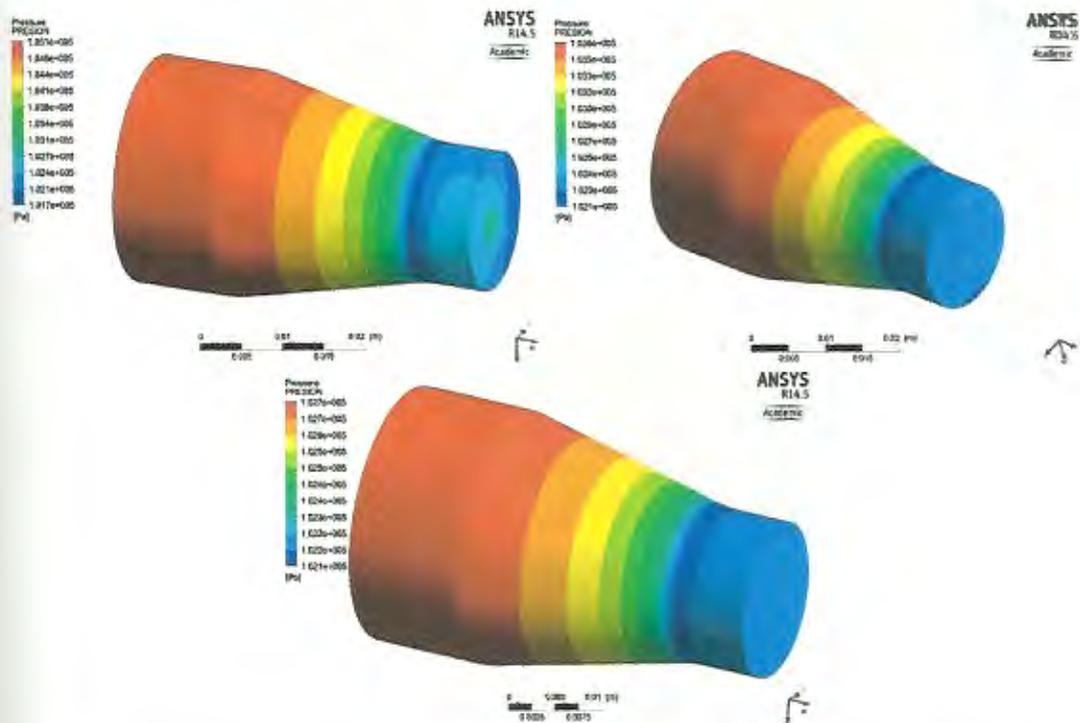


FIGURA 5.3 CONTORNOS DE PRESIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI

En cambio la figura 5.4 corresponde a los contornos de la magnitud de la presión en un plano que atraviesa al volumen del fluido por la mitad, de esta forma entenderá de mejor manera el comportamiento de la presión del fluido a través de todo el volumen de control.

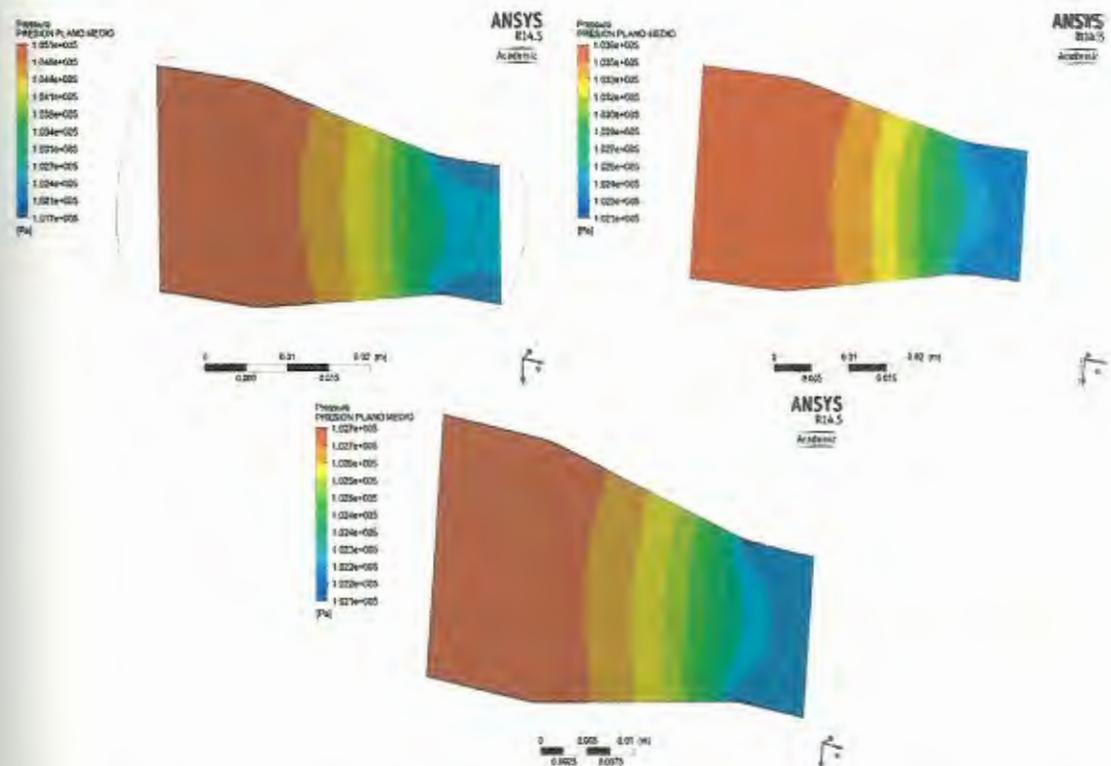


FIGURA 5.4 CONTORNOS DE PRESIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO VENTURI EN UN PLANO QUE ATRAVIESA POR LA MITAD AL VOLUMEN DE CONTROL

En esta figura se observa que la presión del fluido varía longitudinalmente, donde la presión que adquiere el fluido a la

entrada es de magnitud alta y va disminuyendo mientras se va acercando a la zona de convergencia. Esto es lógico debido a que el fluido mientras atraviesa la zona de convergencia experimenta una caída de presión. También se observa que a un alto número de Reynolds la presión de la salida no es uniforme, debido principalmente al cambio de dirección que sufre el fluido entre la zona convergente y la zona recta del medidor de flujo.

Para el análisis de las pruebas obtenidas del medido Venturi, se tomaron de referencia las imágenes obtenidas en la pruebas 1, 5 y 9. Para visualizar todas las pruebas; observar las figuras del capítulo 3.

5.1.1.3 Análisis del Comportamiento del Coeficiente de Descarga a Diferente Número de Reynolds.

Si se observa la figura 3.45, se puede ver que a un bajo número de Reynolds el coeficiente de descarga es bajo; y que como va aumentando el número de Reynolds también aumenta el coeficiente de descarga.

En lo que respecta a la gráfica de dispersión, el valor de la suma del cuadrado de los errores (SSE) y coeficiente de determinación

fueron 0.0002646 y 0.9732 respectivamente. El SSE muestra que los errores entre los valores determinados por CFD y los valores de la curva de regresión son mínimos, mientras que el coeficiente de terminación muestra que la curva de regresión se ajusta muy bien a los datos obtenidos en CFD, esto es porque el coeficiente es muy próximo a la unidad.

5.1.2 Análisis CFD Placa Orificio

El análisis CFD placa orificio tratará de explicar de manera cualitativa los valores que se muestran en las gráficas de contornos de velocidad, contornos de presión y de la gráfica que simula el comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds del medidor placa orificio. Todas estas gráficas se muestran en el capítulo 3.

5.1.2.1 Análisis del contorno de velocidad

Si observa la figura 5.5, muestra los contornos de la magnitud de la velocidad de las pruebas 1, 5 y 9; las cuales fueron realizadas al medidor de flujo placa orificio a diferente número de Reynolds.

Esta figura muestra el contorno de velocidad de las superficies de frontera del volumen de control. En ella se observa que la velocidad

en la proximidad a las paredes del tubo es nula y que la velocidad es mayor mientras más se acerca al centro del volumen del fluido y vuelve a disminuir en su centro, es decir la velocidad no es uniforme. A su vez, la velocidad en su centro va disminuyendo mientras mayor sea el flujo másico, esto se lo puede observar gráficamente en la figura 5.5, donde se puede ver como varia el color del centro del volumen al cambiar el flujo másico.

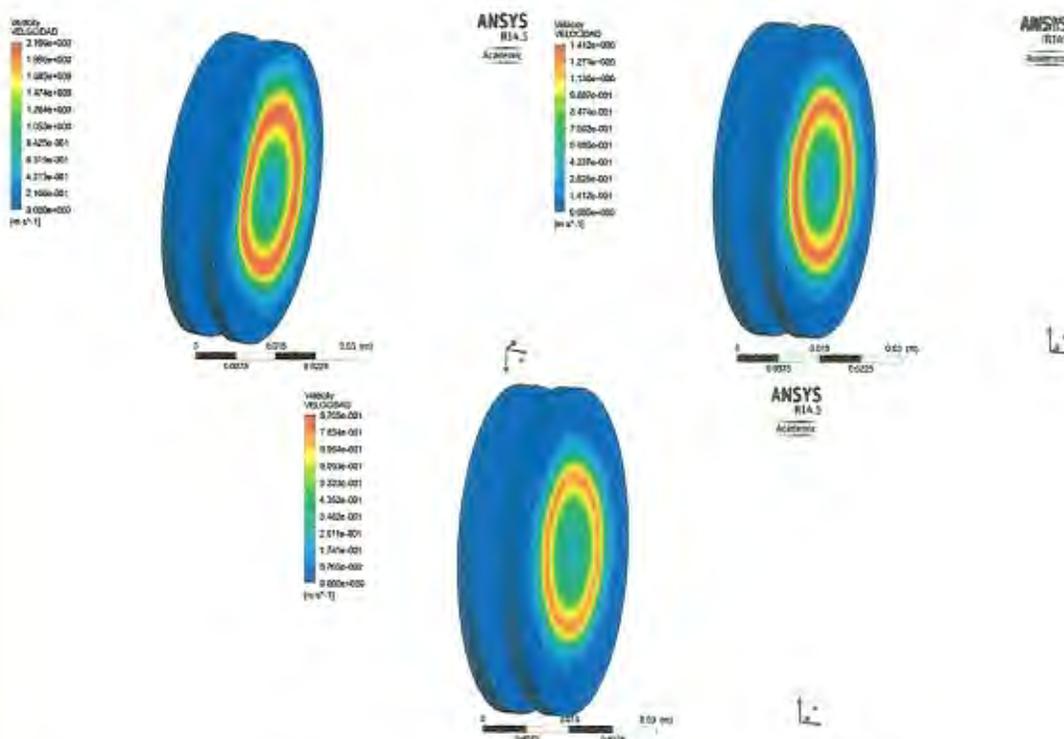


FIGURA 5.5 CONTORNOS DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR DE FLUJO PLACA ORIFICIO

La figura 5.6 corresponde a los contornos de la magnitud de la velocidad en un plano que atraviesa al volumen del fluido por la

mitad, de esta forma se entenderá de mejor manera el comportamiento de la velocidad a través de todo el volumen de control. En esta figura se observa como es el comportamiento de la velocidad a través del medidor de flujo placa orificio. La velocidad es mayor cuando atraviesa el orificio de la placa, pero particularmente es mayor en la zona donde el fluido hace contacto con el filo de la placa, en esta zona se produce una recirculación provocando unos pequeños vórtices en la parte posterior de la placa, creando de esta manera pérdida de presión.

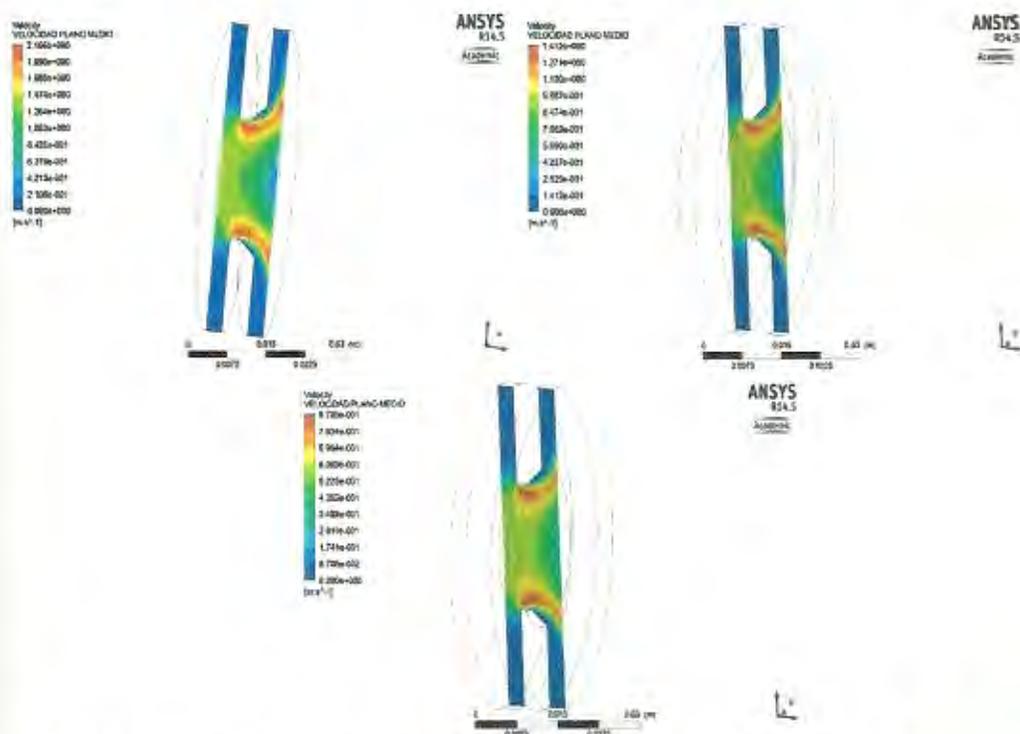
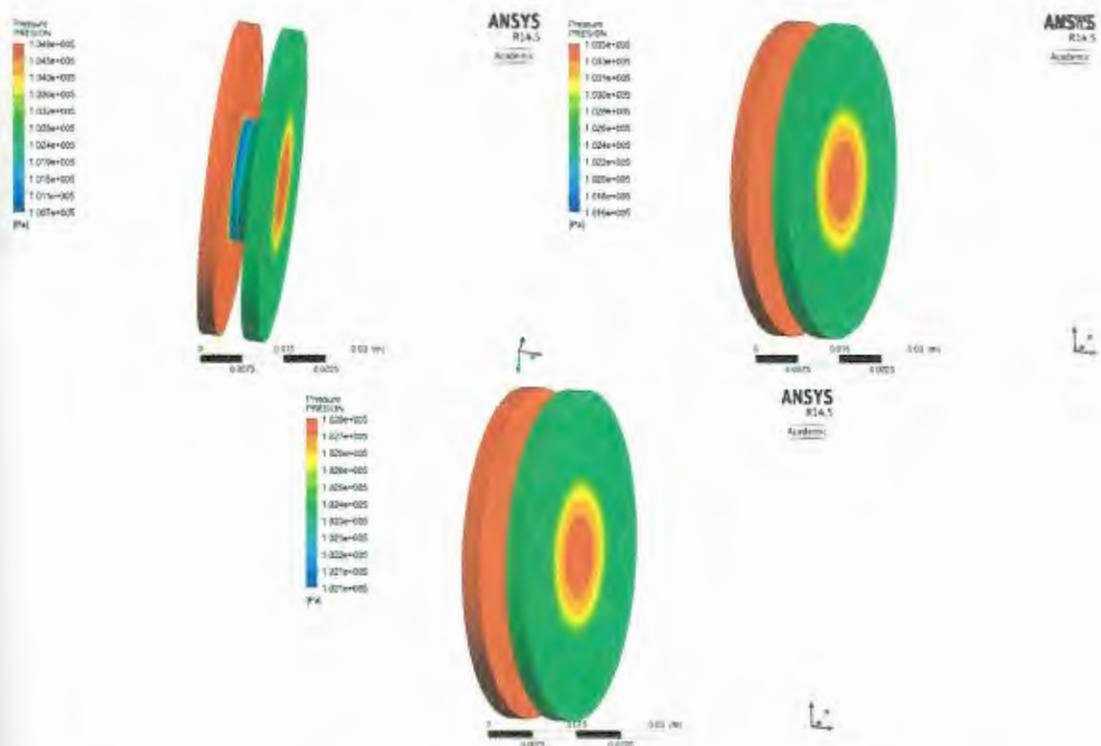


FIGURA 5.6 CONTORNOS DE VELOCIDAD DEL MEDIDOR DE FLUJO PLACA ORIFICIO EN UN PLANO QUE ATRAVIESA POR LA MITAD AL VOLUMEN DE CONTROL

5.1.2.2 Análisis del Contorno de Presión

En la figura 5.7 representa a los contornos de la presión que experimenta el fluido en el interior del medidor de flujo placa orificio a diferente número de Reynolds, a su vez solo muestra el contorno de las superficies de frontera del volumen de control. En ella se muestra que la presión a la entrada del medidor es mayor que al de la salida del medidor, esto se debe a que la presencia de la placa perturba a la continuidad del fluido, provocando de esta manera una pérdida de presión al atravesar este medidor.

También se observa que la presión en la salida no es uniforme, siendo mayor en el centro del volumen de control. Esto verifica que la simulación es correcta, porque en esta zona la velocidad es baja; tal como lo analiza en la sección anterior.



**FIGURA 5.7 CONTORNOS DE PRESIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO
PLACA ORIFICIO**

En cambio la figura 5.8 corresponde a los contornos de la magnitud de la presión en un plano que atraviesa al volumen del fluido por la mitad, de esta forma se entenderá de mejor manera el comportamiento de la presión a través de todo el volumen de control.

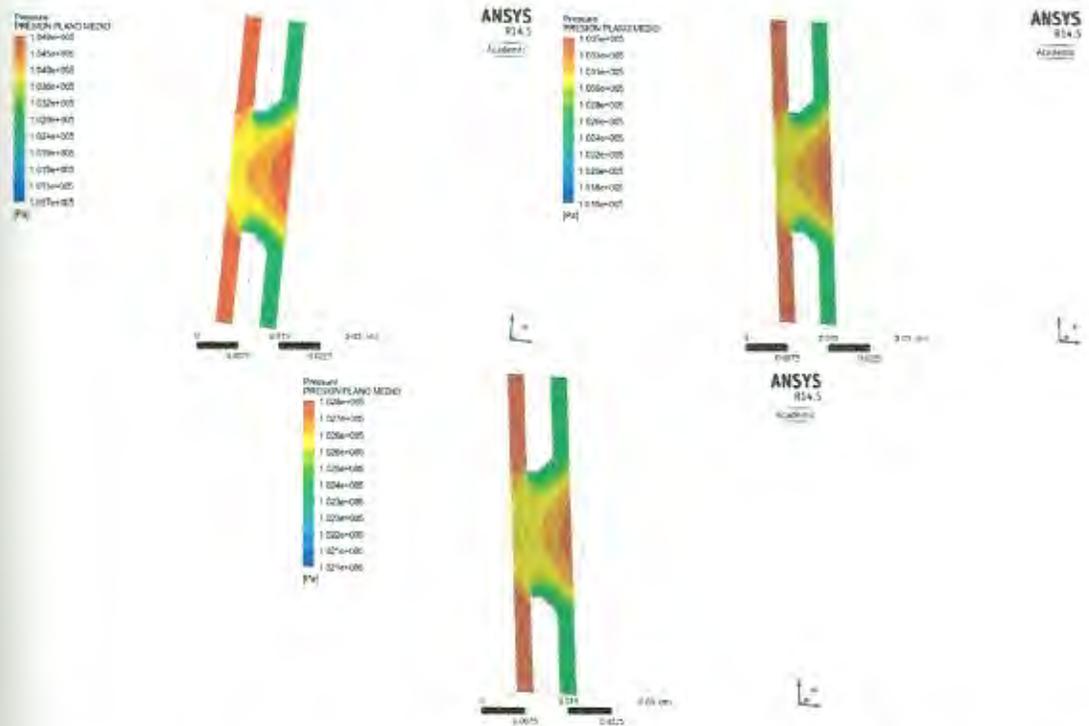


FIGURA 5.8 CONTORNOS DE PRESIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO PLACA ORIFICIO EN UN PLANO QUE ATRAVIESA POR LA MITAD AL VOLUMEN DE CONTROL

Esta figura muestra que la presión disminuye cuando el fluido atraviesa la placa. Para el análisis la dividirá en dos zonas; la zona central del volumen del control y la zona del fluido que tiene contacto con el filo y con la parte posterior de la placa.

La primera zona su presión disminuye al atravesar la placa, luego de atravesarla vuelve aumentar progresivamente; esto depende particularmente del flujo másico (como se observa en la figura 5.8).

La segunda zona su presión es la más baja del volumen del control, esto se debe a que en esta pequeñas zonas es donde se produce la recirculación del fluido, producto del contacto del fluido con el filo de la placa y que se extiende hasta la parte posterior de la placa. Si el contacto fuera más brusco, la pérdida de presión del fluido sería mayor; es por esta razón que el filo posterior de la agujero de la placa tiene un chaflán que permite un mejor direccionamiento del fluido perturbado por el filo anterior.

Para el análisis de las pruebas obtenidas del medidor Placa Orificio, se tomaron de referencia las imágenes obtenidas en la pruebas 1, 5 y 9. Para visualizar todas las pruebas; observar las figuras del capítulo 3.

5.1.2.3 Análisis del Comportamiento del Coeficiente de Descarga a Diferente Número de Reynolds.

Si se observa la figura 3.73, se puede ver que a un bajo número de Reynolds el coeficiente de descarga es bajo; y que como va aumentando el número de Reynolds también aumenta el coeficiente de descarga.

En lo que respecta a la gráfica de dispersión, el valor de la suma del cuadrado de los errores (SSE) y coeficiente de determinación fueron 0.0001858 y 0.9914 respectivamente. El SSE muestra que los errores entre los valores determinados por CFD y los valores de la curva de regresión son mínimos, mientras que el coeficiente de terminación muestra que la curva de regresión se ajusta muy bien a los datos obtenidos en CFD, esto es porque el coeficiente es muy próximo a la unidad.

5.2 Análisis de Resultado del Modelo Físico

El análisis de resultado del modelo físico, consiste en analizar las gráficas que se obtuvieron experimentalmente de los medidores de flujo Tubo Venturi y Placa Orificio en el capítulo 4.

5.2.1 Análisis del Comportamiento del Coeficiente de Descarga a Diferente Número de Reynolds del Venturi.

En la figura 4.11 se observa los datos obtenidos experimentalmente con su respectivo error propagado. Estos valores son datos de dispersión que se ajustaron a una curva de regresión polinómica.

En un análisis físico se puede decir que el coeficiente de descarga disminuye cuando el número de Reynolds también disminuye. Su

valor varía entre 0.991 y 0.887 según lo obtenido experimentalmente, esto indica que este tipo de medidor produce una pérdida de presión baja, por ende la cantidad de energía que se pierde es muy baja en comparación a otros medidores de flujo.

En un análisis estadístico, se dice que el polinomio de regresión cubica; $C_d = -0.0132Re^3 + 0.00218Re^2 + 0.0608Re + 0.9372$ se ajusta correctamente a los valores obtenidos experimentalmente. Esto se lo demuestra mediante los valores SSE (suma de los cuadrados de los residuos) y R-square (coeficiente de determinación); los cuales fueron 0.0006148 y 0.9572. Mientras el SSE tiende a cero y el R-square a 1; determina que el polinomio de regresión cubica se ajusta a los valores experimentales. En lo que respecta al error propagado, se muestra que el polinomio atraviesa por todas la barras de incertidumbre de la figura 4.11, lo cual muestra a su vez que el polinomio es fiable. Los valores de los errores ΔC_d varían de 0.0259 a 0.0085 tal como se muestran en la tabla A.4.

5.2.2 Análisis del comportamiento del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds de la placa orificio.

En la figura 4.13 se observa los datos obtenidos experimentalmente con su respectivo error propagado. Estos valores son datos de dispersión que se ajustaron a una curva de regresión polinómica.

En un análisis físico se puede decir que el coeficiente de descarga disminuye cuando el número de Reynolds también disminuye. Su valor varía entre 0.6435 y 0.5832 según lo obtenido experimentalmente, esto indica que este tipo de medidor produce una pérdida de presión alta, por ende la cantidad de energía que se pierde es muy alta en comparación a otros medidores de flujo.

En un análisis estadístico, se dice que el polinomio de regresión cubica;

$C_d = -2.91 \times 10^{-4} Re^3 + 0.0072 Re^2 - 0.0457 Re + 0.665$ se ajusta *correctamente a los valores obtenidos experimentalmente. Esto se lo demuestra mediante los valores SSE (suma de los cuadrados de los residuos) y R-square (coeficiente de determinación); los cuales fueron 7.471×10^{-5} y 0.9849. Mientras el SSE tiende a cero y el R-square a 1; determina que el polinomio de regresión cubica se ajusta a los valores experimentales. En lo que respecta al error propagado, se muestra que el polinomio atraviesa por todas la*

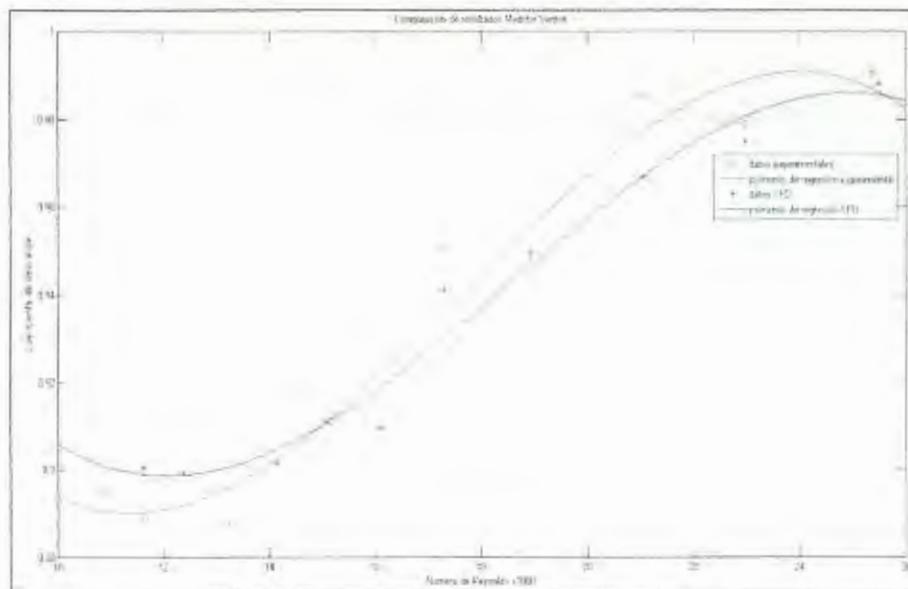
barras de incertidumbre de la figura 4.13, lo cual muestra a su vez que el polinomio es fiable. Los valores de los errores ΔC_d varían de 0.0168 a 0.006 tal como se muestran en la tabla A.6.

5.3 Comparación de resultados

La comparación de resultados, se la realiza específicamente a la gráfica que muestra como varía el coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds con valores experimentales y con valores obtenidos mediante CFD en ambos medidores de flujo.

5.3.1 Comparación de resultados del coeficiente de descarga del Venturi

Las gráficas que muestran los resultados experimentales y CFD del coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds se muestran en las figuras 3.45 y 4.11. A continuación la figura 5.9 une las dos figuras anteriormente mencionadas, mediante el uso de software Matlab R2009 cuyo programa se muestra en el Apéndice C.



**FIGURA 5.9 COMPARACIÓN DE DATOS
EXPERIMENTALES Y CFD DEL MEDIDOR VENTURI**

Observando la figura 5.9, se puede ver que este modelo CFD tiene el mismo comportamiento que el modelo experimental. 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.

5.3.2 Comparación de Resultados del Coeficiente de Descarga de la Placa Orificio.

Las gráficas que muestran los resultados experimentales y CFD del coeficiente de descarga a distinto número de Reynolds se muestran en las figuras 3.73 y 4.13. A continuación la figura 5.10 une las dos

figuras anteriormente mencionadas, mediante el uso de software Matlab R2009 cuyo programa se muestra en el Apéndice C.

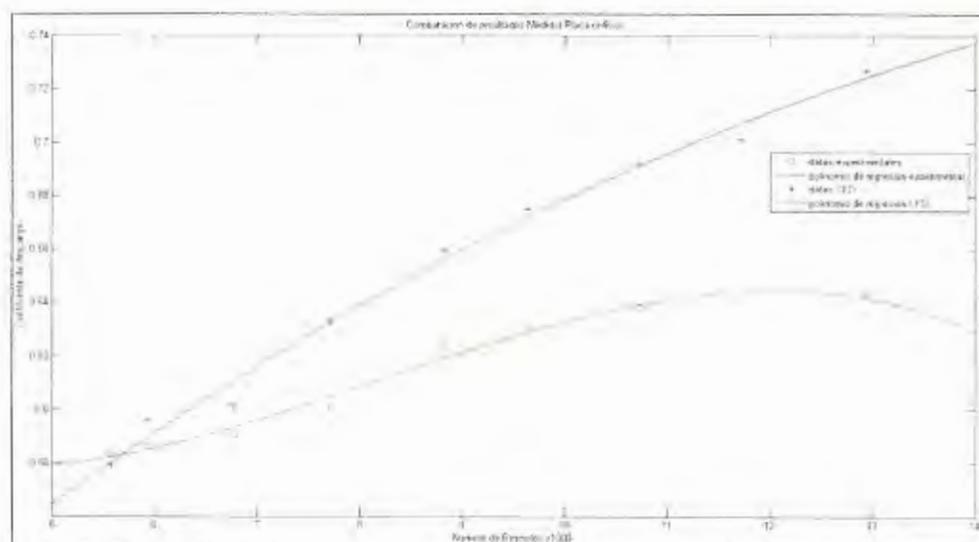


FIGURA 5.10 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y CFD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

Observando la figura 5.10, 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%. Esta diferencia se debe principalmente por el estado del equipo de medición, además el rango de esta diferencia entre ambas graficas; muestra que el modelo CFD para este medidor de flujo sea confiable.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- ✓ Se elaboró un modelo CFD del medidor de flujo Venturi, los resultados obtenidos de este modelo fueron similares a los obtenidos experimentalmente; cuyos valores de diferencia entre ambos modelos varían de 0.5% a 1%, como se muestran en la gráfica 5.9. Con esto se concluye que el modelo CFD tiene alta precisión en predecir el fenómeno físico que experimenta el fluido al atravesar el medidor de flujo Venturi.
- ✓ El medidor de flujo Venturi produce una menor pérdida de energía al fluido, la razón principal es debido a que la geometría del medidor no produce cambios bruscos a la continuidad del fluido. Esta también es una razón por la que su modelo CFD es

- ✓ más fácil de simular; y no introducir de esta manera algún tipo de error a la simulación. Además también es una razón por la que su coeficiente de descarga es mayor que al de otros medidores de flujo, pero su elevado costo de fabricación hace que no sea accesible su uso en la industria.

- ✓ Se elaboró un modelo CFD del medidor de flujo placa orificio, los resultados obtenidos de este modelo se asemejan a los obtenidos experimentalmente; cuyos valores de diferencia entre ambos modelos varían de 9% a 11%, como se muestran en la gráfica 5.10. Con esto se concluye que el modelo CFD predice de manera confiable el fenómeno físico que experimenta el fluido al atravesar el medidor de flujo placa orificio. Por lo tanto los gráficos de contorno de presión y velocidad obtenidos del modelo CFD, muestran de una manera clara como varían estas variables a través del medidor de flujo a diferentes números de Reynolds.

- ✓ El medidor de flujo placa orificio produce una mayor pérdida de energía al fluido, la razón principal es debido a que su geometría compleja produce cambios bruscos a la continuidad del fluido. Por esta razón su coeficiente de descarga es mucho

menor que al del medidor Venturi. Además su geometría produce que se acumule suciedad con el tiempo, lo cual puede obstruir las tomas de presión; produciendo de esta manera algún tipo de error. Por último, es el medidor de flujo más utilizado en la industria debido a su bajo costo de fabricación.

- ✓ Las correlaciones obtenidas de los modelos CFD son resultado de un estudio analítico y numérico del flujo, estas correlaciones permitirían calibrar a los medidores de flujo directamente sin llevar a cabo el proceso experimental de calibración. Es importante notar que el coeficiente de descarga obtenido en forma experimental está sujeto a las condiciones establecidas durante el proceso de calibración del medidor de flujo, por lo que el coeficiente de descarga puede ver disminuida su exactitud. Bajo ese contexto los modelos analíticos y numéricos del coeficiente de descarga son una alternativa viable para llevar a cabo la calibración de los medidores de flujo bajo diferentes condiciones de operación.

- ✓ Las correlaciones obtenidas solo son aplicables a condiciones de flujo de régimen turbulento, debido a que la experimentación fue realizado a esta condición de flujo por estado del equipo de laboratorio que no permitió llegar a un régimen laminar.

- ✓ En general el desenlace de esta presente tesis es muy satisfactorio, ya que los resultados obtenidos por las simulaciones computacionales están muy cercanos a los experimentales. En base a estos buenos resultados se puede afirmar, que el comportamiento del fluido en el interior de los medidores de flujo esta descrito de una forma muy aproximada por los diferentes valores, graficas de contornos y graficas de presión extraídos del post-procesador de ANSYS-CFX.

6.2 Recomendaciones

- ✓ Durante el proceso de la importación de la geometría del modelo, es recomendable guardar en el software que se esté usando para dibujar la geometría, en formato .IGES. De esta manera ANSYS reconoce el archivo al momento de realizar la importación.
- ✓ En el proceso de mallado, se debe estar seguro que no existan puntos, líneas o superficies duplicadas, ondulaciones en la superficie o agujeros que impidan realizar un correcto mallado.
- ✓ Se debe revisar los equipos de laboratorio antes de utilizarlos, para evitar algún tipo de error en la medición.

- ✓ El uso de un cronómetro instalado en el banco de prueba mejoraría la precisión del tiempo que tarda el tanque sumidero en llenarse.

- ✓ Al momento de tomar el tiempo de llenado del tanque, se debe esperar que todo el tanque se vacíe; y en ese momento bajar la palanca y empezar a cronometrar el tiempo en que se llena el tanque sumidero.

APÉNDICE A

DETERMINACIÓN DE ERRORES

1. Propagación de Errores en datos experimentales

Para la realización de estas mediciones se utiliza varios instrumentos los cuales producen dos tipos de errores, los cuales son:

- ✓ Error Sistemático
- ✓ Error Aleatorio

El error sistemático son de magnitud fija y se determina analíticamente y el *error aleatorio* son provocados por variación en las condiciones de medición, estos tipos de errores se determinan estadísticamente.

En este experimento la variable a determinar es el Coeficiente de arrastre (C_d), que es función de las variables Re y Δh , tal como se muestra en la ecuación A.1.

$$C_d = \frac{Re v}{D_a \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(\Delta h)}} \quad \text{Ec. A. 1}$$

Donde;

$$Re = \frac{\dot{m}_r D_a}{v \rho A_a} \quad \text{Ec. A. 2}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_r D_e}{v \rho A_e} \quad \text{Ec. A. 3}$$

Y;

$$\dot{m}_r = \frac{m_{H_2O}}{t} \quad \text{Ec. A. 4}$$

Donde la Ec. A.2 y la Ec.A.3 son las ecuaciones para determinar el número de Reynolds para el medidor de flujo tubo venturí y placa orificio respectivamente. Además la Ec.A.4 es la ecuación para determinar el flujo másico real, para ambos medidores es el mismo flujo.

Los errores aleatorios y sistemáticos se propagan independientemente, la única variable que produce error aleatorio es el tiempo, por ende el flujo másico real posee un error $\Delta \dot{m}_r$. La determinación del $\Delta \dot{m}_r$ es igual a:

$$\Delta \dot{m}_r = \sqrt{S_m^2 + A_m^2} \quad \text{Ec. A. 5}$$

Donde S_m es el error sistemático total y A_m es la magnitud del error aleatorio. El flujo másico real (\dot{m}_r) es solo función del tiempo, y es la única variable que propaga su error. Entonces $S_m = 0$.

La magnitud del error aleatorio se lo determina mediante la Ec. A.6.

$$A_m = \pm t_{\alpha/2, \nu} \frac{\sigma_t}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. A. 6}$$

Donde;

n : Número de muestras

$\alpha = 1 - c$; c : Porcentaje de confianza

$\nu = n - 1$

t : Distribución t-student (Apéndice D)

σ_t : Error aleatorio de la variable t , que es igual a

$$\sigma_t = \sigma_1 \left| \frac{\delta \dot{m}_r}{\delta t} \right| \quad \text{Ec. A. 7}$$

Donde;

σ_1 : Es la desviación estándar de la variable t .

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec. A. 8}$$

\bar{t} : La media muestral de la variable t .

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} \quad \text{Ec. A. 9}$$

Por último;

$$\frac{\delta \dot{m}_r}{\delta t} = - \frac{m_{H_2O}}{t^2} \quad \text{Ec. A. 10}$$

Se tomaron 5 muestras para cada prueba, donde reemplazando estos datos en las ecuaciones A.8 y A.9 se obtiene lo mostrado en la tabla A.1. Estas muestras fueron realizadas a la misma condición para cada prueba.

TABLA A.1

MUESTRAS, TIEMPO PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE CADA PRUEBA

	Prueba1	Prueba2	Prueba3	Prueba4	Prueba5	Prueba6	Prueba7	Prueba8	Prueba9
Muestras t (s)	16.85	18.22	20.11	22.1	24.11	27.6	31.25	36.48	38.55
	16.82	18.35	19.85	22.48	24.31	28.05	31.55	36.15	38.75
	16.7	18.39	19.76	22.36	24.65	27.55	32.1	35.88	38.13
	16.05	18.1	19.95	22.18	24.54	27.65	31.69	35.96	38.27
	16.33	18.44	20.18	22.03	23.89	27.85	31.51	35.88	38.35
\bar{t}	16.55	18.3	19.97	22.23	24.3	27.74	31.62	36.07	38.41
σ_t	0.3478	0.1238	0.1566	0.1666	0.2773	0.1855	0.2790	0.2275	0.2176

Existe $\dot{\Delta}m_r$ para cada prueba, para ello se escoge como referencia los datos de la prueba 1 y mostrar su desarrollo.

Se reemplaza en la Ec. A.10, conociendo que la masa de agua es 8.1Kg y el \bar{t} se obtiene;

$$\frac{\delta \dot{m}_r}{\delta t} = -\frac{8.1}{16.55^2} = -0.0296$$

Se reemplaza este valor en la Ec.A.7, se obtiene;

$$\sigma_t = 0.3478 \times |-0.0296| = 0.0103$$

Se reemplaza estos valores en la Ec. A.6, donde n=5, v=4 y además aplicando la distribución t con un 95% de confianza se obtiene;

$$A_m = \pm t_{0.025,4} \frac{0.0103}{\sqrt{5}} = \pm 0.0128$$

Donde;

$t_{0.025,4} = 2.7765$ (Apéndice D).

Debido a que el error sistemático total es igual a cero, entonces;

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}m_r &= A_m \\ \dot{\Delta}m_r &= \pm 0.0128 \text{ Kg/s} \end{aligned}$$

Este mismo procedimiento se realiza para las otras pruebas. En la tabla A.2 se muestra el error del flujo de masa real ($\Delta\dot{m}_r$) que se obtiene en cada prueba.

TABLA A.2
ERRORES DEL FLUJO DE MASA REAL OBTENIDA EN CADA PRUEBA

Prueba	$\Delta\dot{m}_r$
1	0.0128
2	0.0037
3	0.0039
4	0.0034
5	0.0047
6	0.0024
7	0.0028
8	0.0018
9	0.0015

Debido que para el mismo flujo real se realizaron las mediciones para el medidor tubo venturí y placa orificio, estos errores (tabla A.2) serán utilizados para determinar el error del Coeficiente de descarga en ambos medidores de flujo.

1.1 Propagación de error experimental en el Medidor Tubo Venturi.

Las Ecuaciones A.1 y A.2 son las fórmulas que se utilizarán para determinar el Coeficiente de descarga del medidor de flujo Tubo Venturi, ambas ecuaciones no poseen variables con errores aleatorios, por lo cual el error total será igual al error total sistemático de todas sus variables.

En la Ecuación A.2, la única variable es \dot{m}_r , cuyo error ya fue determinado para cada prueba (tabla A.2). Por lo tanto su error es igual a;

$$\Delta N_r = \dot{m}_r \frac{\delta Re}{\delta \dot{m}_r} \quad \text{Ec. A. 11}$$

Derivando se obtiene que el error ΔRe , es igual a;

$$\Delta Re = \dot{m}_r \frac{D_a}{v \rho A_a} \quad \text{Ec. A. 12}$$

Donde;

$$D_a = 0.026 \text{ m}$$

$$A_a = 5.31 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$v = 9.441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Todos estos valores fueron determinados en el Capítulo 4.

Escogiendo como referencia los datos de la prueba 1 (tabla A.2), se obtiene:

$$\Delta Re = (0.0128) \frac{0.026}{(9.441 \times 10^{-7})(1000)(5.31 \times 10^{-4})} = 662.4032$$

Este mismo procedimiento se realiza para las otras pruebas, los resultados que se obtiene para cada prueba se muestra en la tabla A.3.

TABLA A.3
ERRORES DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA CADA PRUEBA

Prueba	ΔRe
1	662.4032
2	192.8158
3	204.8423
4	175.8921
5	244.9681
6	125.7424
7	145.5771
8	91.2264
9	76.9543

La Ec. A.1 determina el coeficiente de descarga, en esta ecuación existe dos variables por lo cual la ecuación para determinar su error es igual a;

$$\Delta C_d = \sqrt{\left(\Delta Re \left| \frac{\delta C_d}{\delta N_r} \right| \right)^2 + \left(\Delta h \left| \frac{\delta C_d}{\delta h} \right| \right)^2} \quad \text{Ec. A. 13}$$

Derivando $\frac{\delta C_d}{\delta Re}$, se obtiene;

$$\frac{\delta C_d}{\delta Re} = \frac{v}{D_a \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(\Delta h)}} \quad \text{Ec. A. 14}$$

Donde;

$$D_a = 0.026 \text{ m}$$

$$A_a = 5.31 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$v = 9.441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = 0.615$$

$$\Delta h = h_a - h_b \text{ (Tabla 4.3)}$$

Reemplazando estos valores en la Ec.A.14, se obtiene;

$$\frac{\delta C_d}{\delta Re} = \frac{9.441 \times 10^{-7}}{(0.026)0.615^2} \sqrt{\frac{1 - 0.615^4}{2 \times 9.8 \times (0.378 - 0.114)}} = 3.901 \times 10^{-5}$$

Derivando $\frac{\delta C_d}{\delta h}$, se obtiene;

$$\frac{\delta C_d}{\delta h} = - \frac{Re v g (1 - \beta^4)^{1/2}}{D_a \beta^2 (2g(\Delta h))^{3/2}} \text{ Ec. A. 15}$$

Donde;

$$Re = 25386.614 \text{ (Tabla 4.5)}$$

$$\Delta h = h_a - h_b \text{ (Tabla 4.3)}$$

Reemplazando los valores en la Ec.A.15.

$$\begin{aligned} \frac{\delta C_d}{\delta h} &= - \frac{(25386.614)(9.441 \times 10^{-7})(9.8)}{(0.026)(0.615)^2} \frac{(1 - 0.615^4)^{1/2}}{(2 \times 9.8(0.378 - 0.114))^{3/2}} \\ &= -1.8758 \end{aligned}$$

Se escoge los datos de la primera prueba (tablas A.2 y a.3) y se los reemplaza en la Ec.A.13. La resolución del manómetro multitubular es 1 mm, por lo tanto $\Delta h = 0.001 \text{ mm}$.

$$\Delta C_d = \sqrt{(662.4032 | 3.901 \times 10^{-5} |)^2 + (0.001 | -1.8758 |)^2}$$

$$\Delta C_d = 0.0259$$

Este mismo procedimiento se realiza para las otras pruebas, los resultados que se obtiene para cada prueba se muestra en la tabla A.4.

TABLA A.4
ERRORES DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL MEDIDOR TUBO
VENTURI

Prueba	ΔC_d
1	0.0259
2	0.0085
3	0.0100
4	0.0093
5	0.0139
6	0.0086
7	0.0109
8	0.0095
9	0.0098

1.2 Propagación de error experimental en el Medidor Placa Orificio.

Las Ecuaciones A.1 y A.3 son las fórmulas que se utilizarán para determinar el Coeficiente de descarga del medidor de Placa Orificio, ambas ecuaciones no poseen variables con errores aleatorios, por lo cual el error total será igual al error total sistemático de todas sus variables.

En la Ecuación A.2, la única variable es \dot{m}_r , cuyo error ya fue determinado para cada prueba (tabla A.2). Por lo tanto su error es igual a;

$$\Delta N_r = \dot{m}_r \frac{\delta Re}{\dot{m}_r} \quad \text{Ec. A. 16}$$

Derivando se obtiene que el error ΔRe , es igual a;

$$\Delta Re = \dot{m}_r \frac{D_e}{v \rho A_e} \quad \text{Ec. A. 17}$$

Donde;

$$D_e = 0.051 \text{ m}$$

$$A_e = 2.043 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$v = 9.441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Todos estos valores fueron determinados en el Capítulo 4.

Escogiendo como referencia los datos de la prueba 1 (tabla A.2), obtiene:

$$\Delta Re = (0.0128) \frac{0.051}{(9.441 \times 10^{-7})(1000)(2.043 \times 10^{-3})} = 337.696$$

Este mismo procedimiento se realiza para las otras pruebas, los resultados que se obtiene para cada prueba se muestra en la tabla A.5.

TABLA A.5
ERRORES DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA CADA PRUEBA

Prueba	ΔRe
1	337.6957
2	98.2983
3	104.4294
4	89.6705
5	124.8857
6	64.1040
7	74.2158
8	46.5076
9	39.2316

La Ec. A.1 determina el coeficiente de descarga, en esta ecuación existe dos variables por lo cual la ecuación para determinar su error es igual a;

$$\Delta C_d = \sqrt{\left(\Delta Re \left| \frac{\partial C_d}{\partial Re} \right| \right)^2 + \left(\Delta h \left| \frac{\partial C_d}{\partial h} \right| \right)^2} \quad \text{Ec. A. 18}$$

Derivando $\frac{\partial C_d}{\partial Re}$, se obtiene;

$$\frac{\partial C_d}{\partial Re} = \frac{v}{D_e \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(\Delta h)}} \quad \text{Ec. A. 19}$$

Donde;

$$D_e = 0.051 \text{ m}$$

$$A_e = 2.043 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$v = 9.441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = 0.392$$

$$\Delta h = h_e - h_f \text{ (Tabla 4.6)}$$

Reemplazando estos valores en la Ec.A.19, se obtiene;

$$\frac{\delta C_d}{\delta Re} = \frac{9.441 \times 10^{-7}}{(0.051)0.392^2} \sqrt{\frac{1 - 0.392^4}{2 \times 9.8 \times (0.362 - 0.70)}} = 4.9712 \times 10^{-5}$$

Derivando $\frac{\delta C_d}{\delta h}$, se obtiene;

$$\frac{\delta C_d}{\delta h} = - \frac{Re v g (1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}}{D_e \beta^2 (2g(\Delta h))^{\frac{3}{2}}} \text{ Ec. A. 20}$$

Donde;

$$Re = 12942.195 \text{ (Tabla 4.8)}$$

$$\Delta h = h_e - h_f \text{ (Tabla 4.6)}$$

Reemplazando los valores en la Ec.A.20.

$$\frac{\delta C_d}{\delta h} = - \frac{(12942.195)(9.441 \times 10^{-7})(9.8)}{(0.051)(0.392)^2} \frac{(1 - 0.392^4)^{\frac{1}{2}}}{(2 \times 9.8(0.362 - 0.070))^{\frac{3}{2}}} = -1.1018$$

Se escoge los datos de la primera prueba (tablas A.2 y A.5) y se los reemplaza en la Ec.A.13. La resolución del manómetro multitubular es 1 mm, por lo tanto $\Delta h = 0.001 \text{ mm}$.

$$\Delta C_d = \sqrt{(337.696 | 4.9717 \times 10^{-5} |)^2 + (0.001 | -1.1018 |)^2}$$

$$\Delta C_d = 0.0168$$

Este mismo procedimiento se realiza para las otras pruebas, los resultados que se obtiene para cada prueba se muestra en la tabla A.6.

TABLA A.6
ERRORES DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO

Prueba	ΔC_d
1	0.0168
2	0.0055
3	0.0064
4	0.0062
5	0.0091
6	0.0056
7	0.0072
8	0.0061
9	0.0060

APÉNDICE B

REGRESION POLINOMIAL

1. Regresión Polinomial de datos experimentales

En la ingeniería, aunque algunos datos exhiben un patrón marcado, son pobremente representados por una línea recta, entonces una curva será la más adecuada para ajustarse a los datos, una alternativa es ajustar polinomios a los datos mediante regresión polinomial.

En la actualidad existen varias formas para realizar regresión polinomial, la forma tradicional es manualmente; utilizando las fórmulas de estadística descriptiva. Otra forma es mediante un software que simplifique la matemáticas de las estadística descriptiva, que para esta regresión polinomial se usará el Software Matlab R2009.

1.1 Regresión Polinomial con uso de fórmulas.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los polinomios son muy usados en los cálculos numéricos, por sus propiedades. La ecuación de un polinomio de grado n es:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \dots \dots + a_nx^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i$$

Aplicando el método de mínimos cuadrado. La curva propuesta es:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \dots \dots + a_nx^n + e$$

Donde a_i son coeficientes y e es el error. Una estrategia es minimizar la suma de los cuadrados de los residuos (S_r), entre la variable medida (y) y la variable calculada con el modelo lineal, está dada por:

$$S_r = \sum e_i^2 = \sum (y_{i,medida} - y_{i,modelo})^2 = \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 \dots - a_nx_i^n)^2 \quad B.1$$

Las derivadas parciales están dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial a_0} S_r = \frac{\partial}{\partial a_0} \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n)^2$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} S_r = \frac{\partial}{\partial a_1} \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n)^2$$

$$\frac{\partial}{\partial a_n} S_r = \frac{\partial}{\partial a_n} \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n)^2$$

Esto es:

$$\frac{\partial}{\partial a_0} S_r = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} S_r = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n) x_i$$

$$\frac{\partial}{\partial a_n} S_r = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n) x_i^n$$

Igualando a 0 las ecuaciones:

$$\frac{\partial}{\partial a_0} S_r = 0; \quad \frac{\partial}{\partial a_1} S_r = 0 \dots \dots \dots \frac{\partial}{\partial a_n} S_r = 0$$

Omitiendo los pasos siguientes, reordenando para desarrollar el siguiente sistema de ecuaciones normales:

$$\begin{aligned} a_0(m) + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_n \sum x_i^n &= \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 \dots + a_n \sum x_i^{n+1} &= \sum y_i x_i \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 \dots + a_n \sum x_i^{n+2} &= \sum y_i x_i^2 \\ &\dots \\ &\dots \\ a_0 \sum x_i^n + a_1 \sum x_i^{n+1} + a_2 \sum x_i^{n+2} \dots + a_n \sum x_i^{2n} &= \sum y_i x_i^n \end{aligned}$$

Todas las sumatorias son desde $i=1$ hasta m (donde m es el número de puntos). Los coeficientes de las incógnitas se pueden evaluar de manera

directa a partir de los datos observados. El sistema es lineal y puede resolverse por algún método numérico. Los coeficientes a_i son las constantes del polinomio, determinando estos valores en el sistema de ecuaciones; se encuentra el polinomio de regresión de los datos experimentales.

El coeficiente de determinación (r^2) indica cuanto se ajusta la regresión a los datos experimentales. Su valor varía entre 0 y 1, donde 0 indica que no existe relación alguna entre las variables y 1 indica que la regresión polinomial se ajusta a los datos experimentales. Se determina mediante la Ec.B.2.

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad \text{Ec. B. 2}$$

Donde;

S_r : Suma de los cuadrados de los residuos

S_t : Es la magnitud del error residual asociado con la variable dependiente antes de la regresión.

1.2 Regresión Polinomial con uso de Software computacional.

El software que se utilizó para realizar la regresión polinomial es Matlab R2009. En este software existen dos métodos para realizar análisis de datos de dispersión.

- El primer método es el comando *polyfit*, el cual es un comando que determina los coeficientes del polinomio de regresión. Su Sintaxis es la siguiente.

`p=polyfit(x,y,n)`

Donde;

x,y : Son los vectores de las abscisas y de la ordenadas de los datos, respectivamente.

n : Es el grado del polinomio al que se quieren ajustar los datos.

p : Es el vector de los coeficientes de dicho polinomio.

Para $n=1$ tiene la regresión lineal. Si m es el número de datos, el polinomio pasa a través de todos los puntos si $n=m-1$. El grado n del polinomio no puede ser mayor que $m-1$.

- El segundo método es usando la herramienta Curve Fitting Tool, la cual consiste en seleccionar los datos experimentales y ajustar los datos al tipo de regresión que se necesite.

Los resultados que mostrará serán los coeficientes del ajuste seleccionado, la suma de los cuadrados de los residuos (S_r o SSE) y el coeficiente de determinación. (r^2 o R-square).



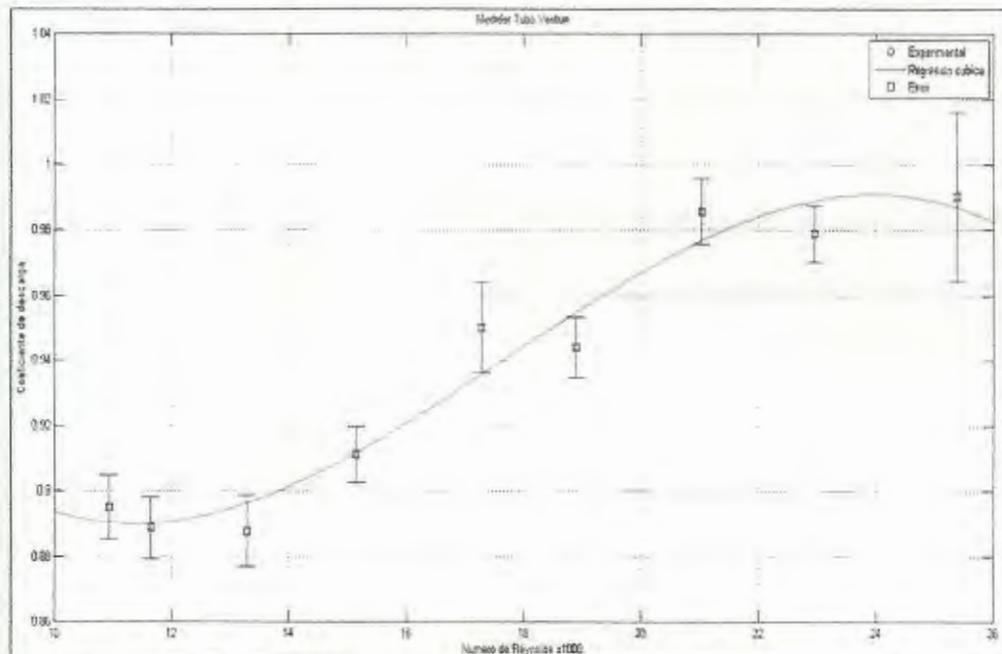
FIGURA B.1 VENTANA DE RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOL¹⁹

1.2.1 Programa de regresión polinómicas de los datos experimentales del medidor Tubo Venturi.

Para la realización del programa, se escogió el comando polyfit; debido a que este comando se lo introduce en un programa y no afecta en graficar los errores. Previamente se revisa cual era el polinomio que se ajustaba a los datos experimentales

(herramienta Curve Fitting tool), para con ello introducirlo en el programa.

```
% Programa de regresión polinomial y error-Venturi%
close all;
clear all;
Nr=[25.3866139 22.9589323 21.0389815 18.9000657 17.2900601 15.1459431
13.2874276 11.6481414 10.9385176];
Cd=[0.99040 0.97896 0.98584 0.94419 0.95034 0.91126 0.88783 0.88888
0.89514];
dCd=[0.0259 0.0085 0.0100 0.0093 0.0139 0.0086 0.0109 0.0095 0.0098];
coeff=polyfit(Nr,Cd,3);
Nrp=10:0.1:26;
Cdp=polyval(coeff,Nrp);
plot(Nr,Cd,'bo')
hold on
grid on
plot(Nrp,Cdp,'r')
errorbar(Nr,Cd,dCd,'s')
xlabel('Número de Reynolds x1000');
ylabel('Coeficiente de descarga');
```



**GRAFICA B.2 RESULTADO DEL PROGRAMA DE REGRESIÓN DE LOS DATOS
EXPERIMENTALES DEL MEDIDOR TUBO VENTURÍ**

Los datos que se obtuvieron fueron:

SSE (S_r): 0.0006148

R-square (r^2): 0.9572

$p_1 = -0.01318$

$p_2 = 0.002175$

$p_3 = 0.06081$

$p_4 = 0.9372$

Donde;

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

Por lo tanto la ecuación de regresión polinomial es:

$$C_d = -0.0132Re^3 + 0.00218Re^2 + 0.0608Re + 0.9372$$

1.2.2 Programa de regresión polinómicas de los datos experimentales del medidor Placa Orificio.

El procedimiento para la realización del programa de regresión polinomial para el medidor de flujo placa orificio es idéntico al realizado para el medidor de flujo Tubo Venturí.

% Programa de regresión polinomial y error-Placa Orificio%

close all;

clear all;

Nr=[12.9421953 11.7045537 10.7257553 9.63532761 8.81454044 7.72146116

6.77398269 5.93826816 5.57649916];

Cd=[0.6435 0.6405 0.6380 0.6316 0.6241 0.6014 0.5905 0.5865 0.5832];

dCd=[0.0168 0.0055 0.0064 0.0062 0.0091 0.0056 0.0072 0.0061 0.0060];

coeff=polyfit (Nr,Cd,3);

Nrp=5:0.1:14;

Cdp=polyval(coeff,Nrp);

plot(Nr,Cd,'bo')

hold on

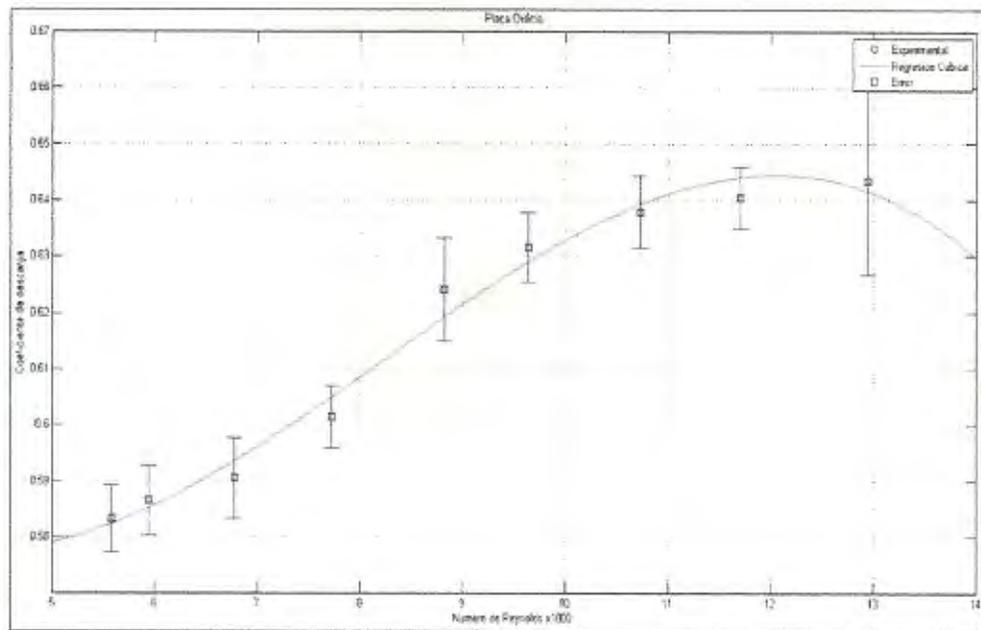
grid on

plot(Nrp,Cdp,'r')

errorbar(Nr,Cd,dCd,'s')

xlabel('Número de Reynolds x1000');

ylabel('Coeficiente de descarga');



GRAFICA B.3 RESULTADO DEL PROGRAMA DE REGRESIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

Los datos que se obtuvieron fueron:

$$SSE (S_r): 7.471 \times 10^{-5}$$

$$R\text{-square } (r^2): 0.9849$$

$$p_1 = -2.911 \times 10^{-4}$$

$$p_2 = 0.00716$$

$$p_3 = -0.0457$$

$$p_4 = 0.665$$

Donde;

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

Por lo tanto la ecuación de regresión polinomial es:

$$C_d = -2.91 \times 10^{-4} Re^3 + 0.0072 Re^2 - 0.0457 Re + 0.665$$

APÉNDICE C

PROGRAMAS DE COMPARACION DE DATOS

1. Comparación de datos experimentales en el medidor Tubo Venturi

Se comparan los datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Termofluidos-ESPOL con los datos experimentales que se muestran en la guía práctica original del equipo.

Se determinara el coeficiente de descarga y Número de Reynolds usando las ecuaciones deducidas en el Capítulo 4. En la tabla C.1, se muestran los datos experimentales y los resultados obtenidos.

TABLA C.1
DATOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MEDIDOR
TUBO VENTURÍ EN LA GUÍA PRÁCTICA ORIGINAL

Prueba	Altura rotámetro (cm)	h_a (mm)	h_b (mm)	m_{H_2O} (kg)	t (s)	Flujo másico real (kg/s)	Re	C_d
1	22.5	372	116	30	63,4	0.4732	24544.249	0.9724
2	20.6	358	140	30	67,6	0.4438	23019.311	0.9883
3	18.8	346	164	30	76,2	0.3937	20421.331	0.9595
4	17.4	338	180	30	83,2	0.3606	18703.19	0.9432
5	15.5	326	199	30	92	0.3261	16914.189	0.9514
6	14.1	317	213	15	51,6	0.2907	15078.541	0.9372
7	12.5	309	224	15	57	0.2632	13650.047	0.9385
8	10.7	302	236	15	64,8	0.2315	12006.986	0.9369
9	9.6	297	243	15	72,2	0.2078	10776.353	0.9296

Se realiza regresión polinomial a los datos de la tabla C.1 para compararlos con los obtenidos en el apéndice B.

El programa que se utiliza para comparar ambos gráficos es el que se muestra a continuación.

```
%Programa de regresión y comparación de gráficos%
```

```
close all;
```

```
clear all;
```

```
Nr=[25.3866139 22.9589323 21.0389815 18.9000657 17.2900601 15.1459431 13.2874276  
11.6481414 10.9385176];
```

```
Cd=[0.99040 0.97896 0.98584 0.94419 0.95034 0.91126 0.88783 0.88888 0.89514];
```

```
Nr1=[24.544249 23.019311 20.421331 18.70319 16.914189 15.078541 13.650047 12.006986  
10.776353];
```

```
Cd1=[0.9724 0.9883 0.9595 0.9432 0.9514 0.9372 0.9385 0.9369 0.9296];
```

```
coeff1=polyfit (Nr,Cd,3);
```

```
coeff2=polyfit (Nr1,Cd1,3);
```

```
Nrp=10:0.1:26;
```

```
Cdp=polyval(coeff1,Nrp);
```

```
Cdp1=polyval(coeff2,Nrp);
```

```
plot(Nr,Cd,'bo')
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
plot(Nr1,Cd1,'r+')
```

```
plot(Nrp,Cdp,'b')
```

```
plot(Nrp,Cdp1,'r')
```

```
xlabel('Número de Reynolds x1000');
```

```
ylabel('Coeficiente de descarga');
```

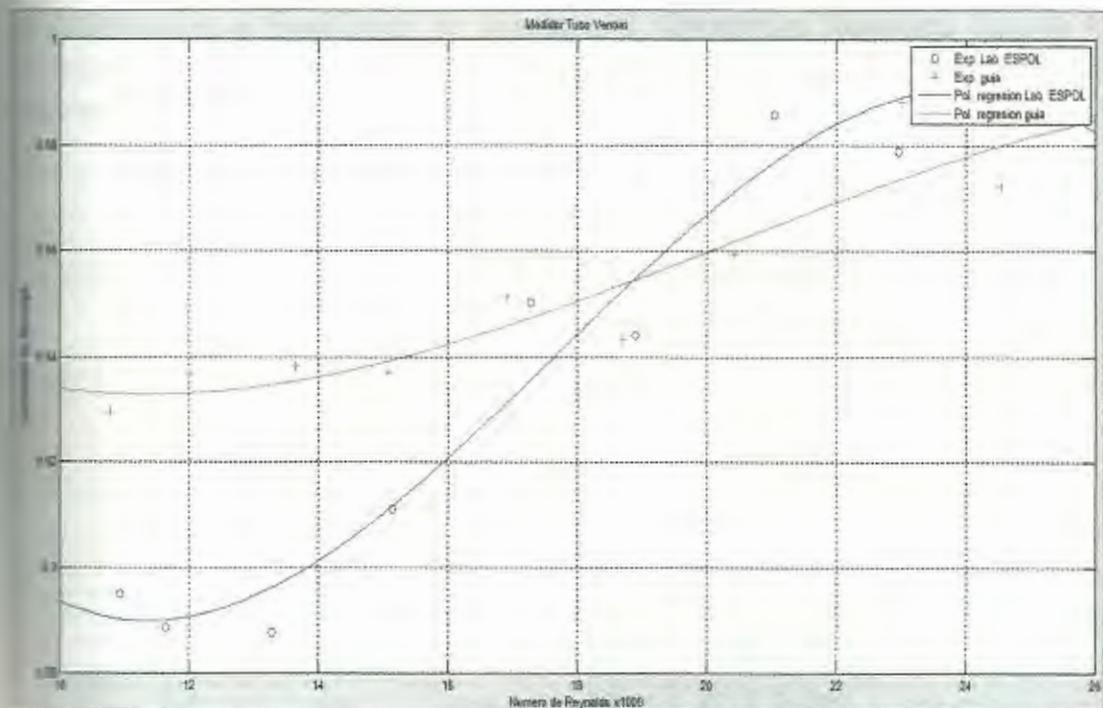


FIGURA C.1 POLINOMIOS DE REGRESIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL MEDIDOR TUBO VENTURI.

La curva de color azul representa el polinomio de regresión de los datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de termofluidos, mientras la curva de color rojo representa el polinomio de regresión de los datos experimentales de la guía práctica original.

Analizando gráficamente se deduce que a un alto número de Reynolds la diferencia entre ambas graficas es muy pequeña, pero si disminuye el número de Reynolds su diferencia es mayor; esto se debe a los errores producidos al medir el cabezal estático y el tiempo del flujo másico real. Cabe recalcar que las condiciones a las que se desarrollaron los experimentos no son idénticas, debido a que el tiempo de uso de los equipos es diferente en ambos experimentos; lo cual también hace variar el resultado de las mediciones.

2. Comparación de datos experimentales en el medidor Placa orificio

Se comparan los datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Termofluidos-ESPOL con los datos experimentales que se muestran en la guía práctica original del equipo.

Se determinara el coeficiente de descarga y Número de Reynolds usando las ecuaciones deducidas en el Capítulo 4. En la tabla C.2, se muestran los datos experimentales y los resultados obtenidos.

TABLA C.2
DATOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MEDIDOR
PLACA ORIFICIO EN LA GUÍA PRÁCTICA ORIGINAL

Prueba	Altura rotámetro (cm)	h_e (mm)	h_f (mm)	m_{H_2O} (kg)	t (s)	Flujo másico real (kg/s)	Re	C_d
1	22.5	354	44	30	63,4	0.4732	12512.755	0.6038
2	20.6	342	79	30	67,6	0.4438	11735.335	0.6148
3	18.8	331	113	30	76,2	0.3937	10410.875	0.5990
4	17.4	323	138	30	83,2	0.3606	9534.9596	0.5956
5	15.5	314	166	30	92	0.3261	8622.9200	0.6022
6	14.1	306	184	15	51,6	0.2907	7687.0992	0.5913
7	12.5	301	201	15	57	0.2632	6958.8477	0.5912
8	10.7	294	218	15	64,8	0.2315	6121.2086	0.5965
9	9.6	291	228	15	72,2	0.2078	5493.8271	0.5880

Se realiza regresión polinomial a los datos de la tabla C.2 para compararlos con los obtenidos en el apéndice B.

El programa que se utiliza para comparar ambos gráficos es el que se muestra a continuación.

```
% Programa de regresión y comparación de gráficos %
```

```
close all;
```

```
clear all;
```

```
Nr=[12.9421953 11.7045537 10.7257553 9.63532761 8.81454044 7.72146116 6.77398269  
5.93826816 5.57649916];
```

```
Cd=[0.6435 0.6405 0.6380 0.6316 0.6241 0.6014 0.5905 0.5865 0.5832];
```

```
Nr1=[12.512755 11.735335 10.410875 9.5349596 8.62292 7.6870992 6.9588477 6.1212086  
5.4938271];
```

```
Cd1=[0.6038 0.6148 0.5990 0.5956 0.6022 0.5913 0.5912 0.5965 0.5880];
```

```
coeff1=polyfit (Nr,Cd,3);
```

```
coeff2=polyfit (Nr1,Cd1,3);
```

```
Nrp=5:0.1:14;
```

```
Cdp1=polyval(coeff1,Nrp);
```

```
Cdp2=polyval(coeff2,Nrp);
```

```
plot(Nr,Cd,'bo')
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
plot(Nr1,Cd1,'r+')
```

```
plot(Nrp,Cdp1,'b')
```

```
plot(Nrp,Cdp2,'r')
```

```
xlabel('Número de Reynolds x1000');
```

```
ylabel('Coeficiente de descarga');
```

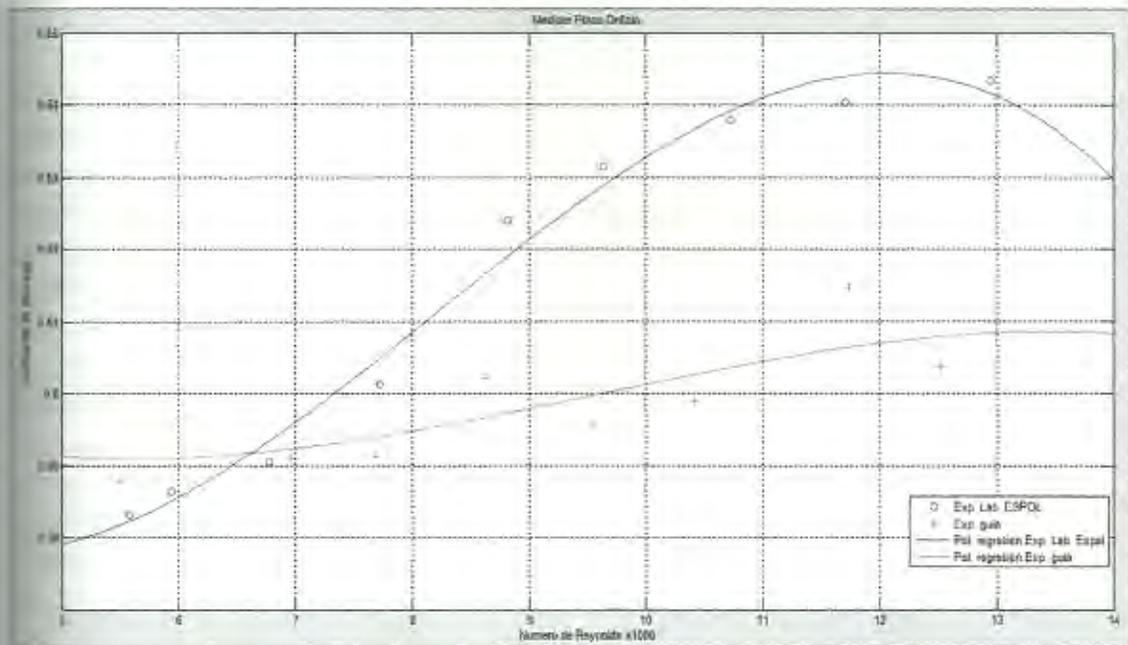


FIGURA C.2 POLINOMIOS DE REGRESIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL MEDIDOR PLACA ORIFICIO.

La curva de color azul representa el polinomio de regresión de los datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de termofluidos, mientras la curva de color rojo representa el polinomio de regresión de los datos experimentales de la guía práctica original.

Analizando gráficamente se deduce que a un alto número de Reynolds la diferencia entre ambas graficas es mayor, pero si disminuye el número de Reynolds su diferencia es baja; esto se debe a los errores producidos al medir el cabezal estático y el tiempo del flujo másico real. Cabe recalcar que las condiciones a las que se desarrollaron los experimentos no son idénticas, debido a que el tiempo de uso de los equipos es diferente en ambos experimentos; lo cual también hace variar el resultado de las mediciones.

3. Programa de regresión polinómica de datos obtenidos del CFD-Medidor de flujo Tubo Venturi

Para la realización del programa, se escogió el comando polyfit; debido a que este comando se lo introduce en un programa y no afecta en graficar los errores. Previamente se revisa cual era el polinomio que se ajustaba a estos datos experimentales (herramienta Curve Fitting tool), para con ello introducirlo en el programa.

```

%Regresion CFD%
close all;
clear all;
Nr=[25.4848 22.9724 21.0513 18.9108 17.2995 16.0772 14.1137 12.362 11.6167];
Cd=[0.9881 0.9749 0.9670 0.9494 0.9413 0.9097 0.9015 0.8994 0.9006];
coeff=polyfit (Nr,Cd,3);
Nrp=10:0.1:26;
Cdp=polyval(coeff,Nrp);
plot(Nr,Cd,'bo')
hold on
grid on
plot(Nrp,Cdp,'b')
xlabel('Número de Reynolds x1000');
label('Coeficiente de descarga');

```

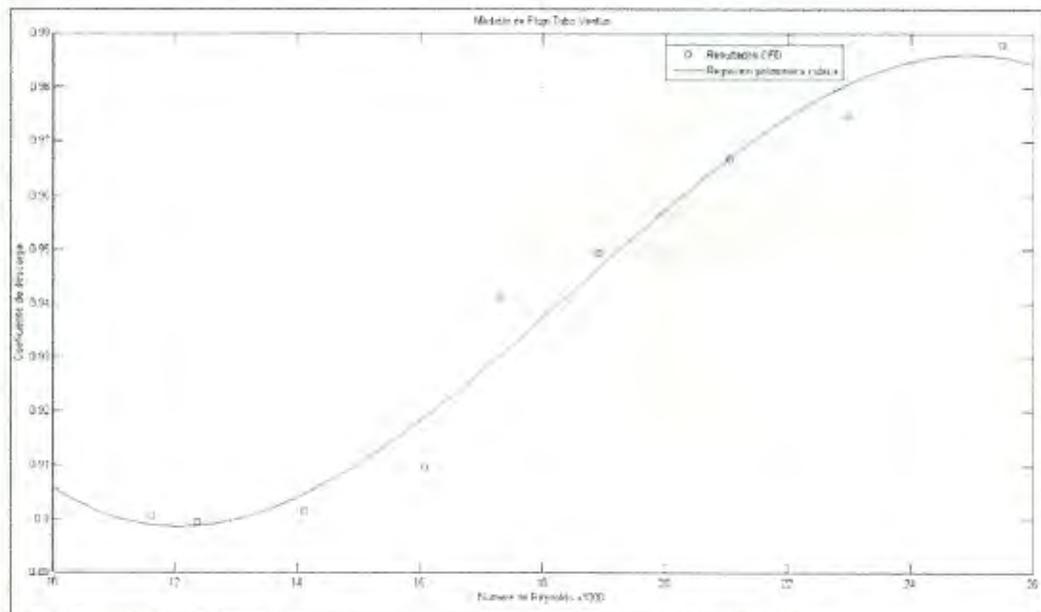


FIGURA C.3 GRAFICO DE REGRESIÓN POLINÓMICA DE DATOS OBTENIDOS MEDIANTE CFD-MODELO TUBO VENTURI

Los datos que se obtuvieron fueron:

SSE (S_r): 0.0002646

R-square (r^2): 0.9732

$p_1 = -8.16 \times 10^{-5}$

$p_2 = 0.004528$

$p_3 = -0.07358$

$p_4 = 0.949$

Donde;

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

Por lo tanto la ecuación de regresión polinomial es:

$$C_d = -8.16 \times 10^{-5} Re^3 + 0.004528 Re^2 - 0.07358 Re + 0.949$$

4. Programa de regresión polinómica de datos obtenidos del CFD-Medidor de flujo Placa orificio

Para la realización del programa, se escogió el comando polyfit; debido a que este comando se lo introduce en un programa y no afecta en graficar los errores. Previamente se revisa cual era el polinomio que se ajustaba a estos datos experimentales (herramienta Curve Fitting tool), para con ello introducirlo en este programa.

```
%Regresion CFD%
```

```
close all;
```

```
clear all;
```

```
Nr=[12.9418 11.7135 10.7331 9.63825 8.8161 7.72224 6.77661 5.94065 5.57823];
```

```
Cd=[0.7270 0.7014 0.6921 0.6752 0.6595 0.6331 0.6017 0.5962 0.5791];
```

```
coeff=polyfit (Nr,Cd,3);
```

```
Nrp=5:0.1:14;
```

```
Cdp=polyval(coeff,Nrp);
```

```
plot(Nr,Cd,'ro')
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
plot(Nrp,Cdp,'r')
```

```
title('Numero de Reynolds x1000');
```

```
xlabel('Coeficiente de descarga');
```

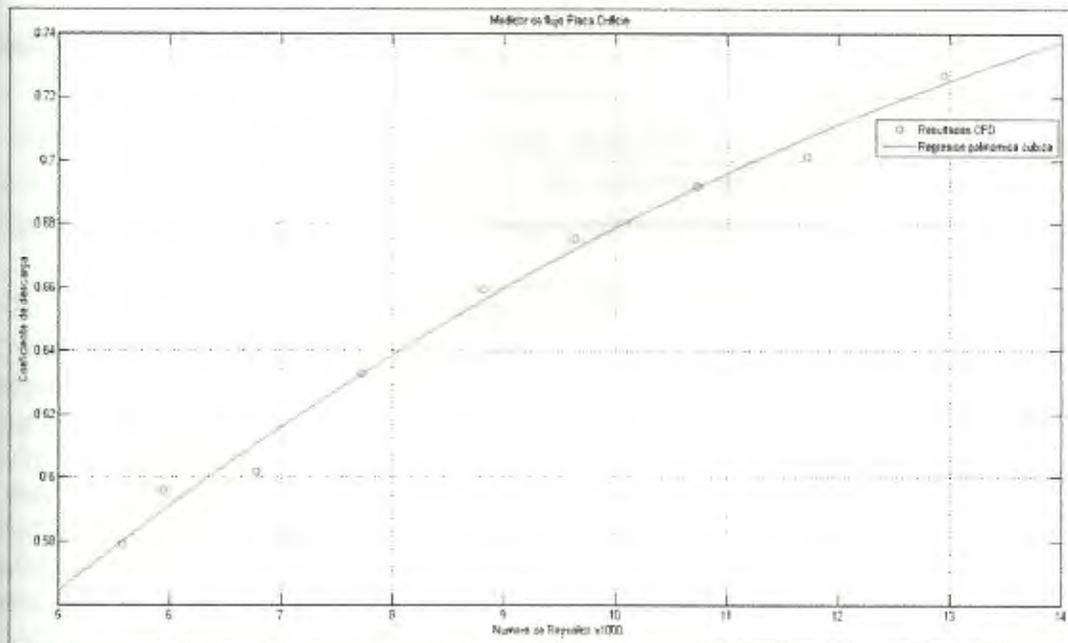


FIGURA C.4 GRÁFICO DE REGRESIÓN POLINÓMICA DE DATOS OBTENIDOS MEDIANTE CFD-MODELO PLACA ORIFICIO

Los datos que se obtuvieron fueron:

SSE (S_r): 0.0001858

R-square (r^2): 0.9914

$p_1 = 7.932 \times 10^{-6}$

$p_2 = -0.00115$

$p_3 = 0.03865$

$p_4 = 0.399$

Donde;

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

Por lo tanto la ecuación de regresión polinomial es:

$$C_d = 7.932 \times 10^{-6} Re^3 - 0.00115 Re^2 + 0.03865 Re + 0.399$$

5. Programa de comparación de resultados experimentales y CFD del medidor tubo Venturi

El programa se basa en los programas realizados en el apéndice B sección 1.1.2 y en el apéndice C sección 3. Se unieron ambos programas con un lenguaje de códigos correctos, y se obtuvo como resultado la gráfica C.5.

```
% Programa de comparación de resultados- Medidor Venturi%
%Programa experimental%
close all;
clear all;
Nr=[25.3866139 22.9589323 21.0389815 18.9000657 17.2900601 15.1459431 13.2874276
11.6481414 10.9385176];
Cd=[0.99040 0.97896 0.98584 0.94419 0.95034 0.91126 0.88783 0.88888 0.89514];
coeff=polyfit (Nr,Cd,3);
Nrp=10:0.1:26;
Cdp=polyval(coeff,Nrp);
plot(Nr,Cd,'ro')
hold on
grid on
plot(Nrp,Cdp,'r')
xlabel('Número de Reynolds x1000');
ylabel('Coeficiente de descarga');

%Programa CFD%
Nr1=[25.4848 22.9724 21.0513 18.9108 17.2995 16.0772 14.1137 12.362 11.6167];
Cd1=[0.9881 0.9749 0.9670 0.9494 0.9413 0.9097 0.9015 0.8994 0.9006];
coeff1=polyfit (Nr1,Cd1,3);
Cdp1=polyval(coeff1,Nrp);
plot(Nr1,Cd1,'b+')
hold on
grid on
plot(Nrp,Cdp1,'b')
```

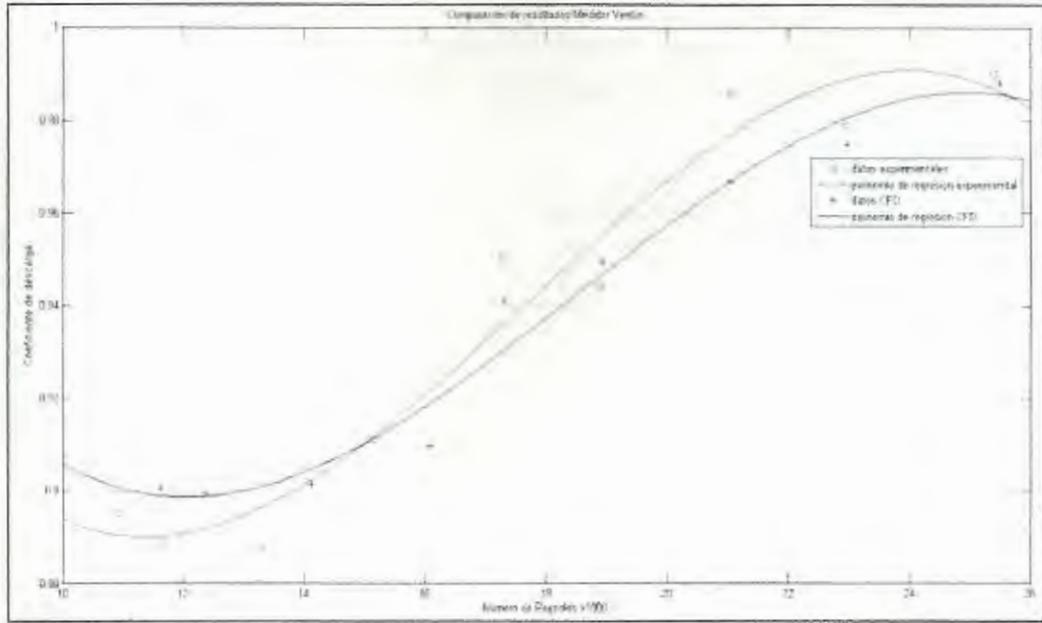


FIGURA C.5 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y CFD DEL MEDIDOR VENTURI

6. Programa de comparación de resultados experimentales y CFD del medidor Placa orificio

El programa se basa en los programas realizados en el apéndice B sección 1.1.3 y en el apéndice C sección 4. Se unieron ambos programas con un lenguaje de códigos correctos, y se obtuvo como resultado la gráfica C.6.

```
% Programa de comparación de resultados- Medidor Placa orificio%
%Programa experimental%
close all;
clear all;
Nr=[12.9421953 11.7045537 10.7257553 9.63532761 8.81454044 7.72146116 6.77398269
5.93826816 5.57649916];
Cd=[0.6435 0.6405 0.6380 0.6316 0.6241 0.6014 0.5905 0.5865 0.5832];
coeff=polyfit (Nr,Cd,3);
Nrp=5:0.1:14;
Cdp=polyval(coeff,Nrp);
plot(Nr,Cd,'ro')
hold on
grid on
plot(Nrp,Cdp,'r')
xlabel('Número de Reynolds x1000');
ylabel('Coeficiente de descarga');
```

%Regresión CFD%

```
Nr1=[12.9418 11.7135 10.7331 9.63825 8.8161 7.72224 6.77661 5.94065 5.57823];
```

```
Cd1=[0.7270 0.7014 0.6921 0.6752 0.6595 0.6331 0.6017 0.5962 0.5791];
```

```
coeff1=polyfit (Nr1,Cd1,3);
```

```
Cdp1=polyval(coeff1,Nrp);
```

```
plot(Nr1,Cd1,'b+')
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
plot(Nrp,Cdp1,'b')
```

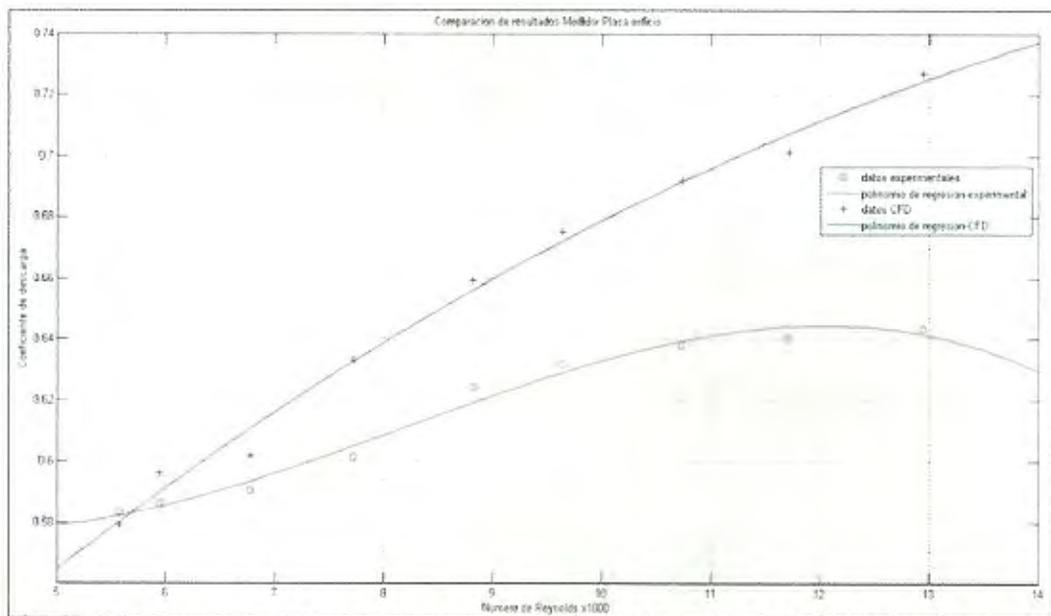


FIGURA C.6 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y CFD DEL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

APENDICE D

Tabla de la *t* de Student.

Contiene los valores *t* tales que $P\{T > t\} = \alpha$,
donde *n* son los grados de libertad.



<i>n</i> \ α	0.30	0.25	0.20	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0025	0.001	0.0005
1	0.7265	1.0000	1.3764	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559	127.3213	318.3088	636.6192
2	0.6172	0.8165	1.0607	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250	14.0890	22.3271	31.5991
3	0.5844	0.7649	0.9785	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408	7.4533	10.2145	12.9240
4	0.5686	0.7407	0.9410	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.8041	5.5976	7.1732	8.6103
5	0.5594	0.7267	0.9195	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321	4.7733	5.8934	6.8688
6	0.5534	0.7176	0.9057	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074	4.3168	5.2076	5.9588
7	0.5491	0.7111	0.8960	1.4149	1.8946	2.3846	2.9979	3.4995	4.0293	4.7853	5.4079
8	0.5459	0.7064	0.8889	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554	3.8325	4.5008	5.0413
9	0.5435	0.7027	0.8834	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498	3.6897	4.2968	4.7809
10	0.5415	0.6998	0.8791	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693	3.5814	4.1437	4.5869
11	0.5399	0.6974	0.8755	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058	3.4966	4.0247	4.4370
12	0.5386	0.6955	0.8726	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545	3.4284	3.9296	4.3178
13	0.5375	0.6938	0.8702	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123	3.3725	3.8520	4.2208
14	0.5366	0.6924	0.8681	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768	3.3257	3.7874	4.1405
15	0.5357	0.6912	0.8662	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467	3.2860	3.7328	4.0728
16	0.5350	0.6901	0.8647	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208	3.2520	3.6862	4.0150
17	0.5344	0.6892	0.8633	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982	3.2224	3.6458	3.9651
18	0.5338	0.6884	0.8620	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784	3.1966	3.6105	3.9216
19	0.5333	0.6876	0.8610	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609	3.1737	3.5794	3.8834
20	0.5329	0.6870	0.8600	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453	3.1534	3.5518	3.8495
21	0.5325	0.6864	0.8591	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314	3.1352	3.5272	3.8193
22	0.5321	0.6858	0.8583	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188	3.1188	3.5050	3.7921
23	0.5317	0.6853	0.8575	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073	3.1040	3.4850	3.7676
24	0.5314	0.6848	0.8569	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970	3.0905	3.4668	3.7454
26	0.5309	0.6840	0.8557	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787	3.0669	3.4350	3.7066
28	0.5304	0.6834	0.8546	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633	3.0469	3.4082	3.6739
29	0.5302	0.6830	0.8542	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564	3.0380	3.3962	3.6594
30	0.5300	0.6828	0.8538	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500	3.0298	3.3852	3.6460
40	0.5286	0.6807	0.8507	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045	2.9712	3.3069	3.5510
∞	0.5244	0.6745	0.8416	1.2816	1.6449	1.9600	2.3283	2.5758	2.8070	3.0902	3.2905

ANEXO-TESIS

PRÁCTICA

"Elaboración de modelos CFD para medidores de flujos y validación experimental "

Objetivos:

- ✓ *Elaborar modelos CFD para los medidores de flujo: Venturi y placa orificio.*
- ✓ *Determinar el Coeficiente de descarga a diferente número de Reynolds mediante técnica CFD y experimentalmente.*
- ✓ *Comparar los resultados obtenidos.*
- ✓ *Validar la aplicación del CFD al estudio y desarrollo de los medidores de flujo.*

Introducción:

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés - Computational Fluids Dynamics); se ha convertido en una herramienta importante para los ingenieros que estudian el comportamiento de los diferentes tipos de fluidos, consiste en el análisis del movimiento de los fluidos mediante simulaciones con ordenadores. Su 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 pequeños elementos y resolviendo allí dichas ecuaciones.

La presente práctica estudiará el comportamiento del fluido en el interior de los medidores de flujos (Placa Orificio y Venturi) a distintas condiciones de operación; *y se validará el estudio realizado; mediante la comparación con los resultados obtenidos experimentalmente en el banco de prueba de medidores de flujo.*

Fundamentos teóricos:

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.

Caudal o flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo; si el área es constante y el flujo es completamente desarrollado la fórmula del caudal es:

$$Q = u \cdot A \quad \text{Ec. 1}$$

Donde;

A= área de la sección por la que circula el fluido (m²) o (ft²)

u= Velocidad promedio del fluido (m/s) o (ft/s)

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Este comportamiento del fluido dentro de un ducto circular depende de cuatro variables: la densidad del fluido ρ , su viscosidad dinámica μ , el diámetro del tubo D Y la velocidad promedio del flujo v .

La relación que existe entre estas cuatro variables producen un número adimensional conocido como *número de Reynolds*, independiente del sistema de unidades de las variables mencionadas.

La ecuación siguiente muestra la definición básica del número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad \text{Ec. 2}$$

Para determinar cuantitativamente el flujo existen una gran variedad de medidores de flujo, entre los cuales se tiene: disco giratorio, medidor de turbina, medidores de carga variable, rotámetro y etc... Pero en esta sección se explica brevemente sobre los medidores de carga variable; cuyo principio fundamental es el siguiente: Cuando se restringe una corriente de fluido, su presión disminuye en una cantidad que depende del flujo volumétrico a través de la restricción. Por tanto, la diferencia de presión entre puntos antes y después de la restricción se utiliza para indicar el flujo volumétrico. Los tipos más comunes de medidores de carga variable son el tubo Venturi y placa orificio.

En la figura 1 se muestra el aspecto básico del tubo Venturi. El flujo que viene de la tubería principal de la sección 1 se hace acelerar a través de una sección estrecha denominada garganta, donde la presión del fluido disminuye. Después, el flujo se expande a través de una porción divergente que alcanza el mismo diámetro de la tubería principal.

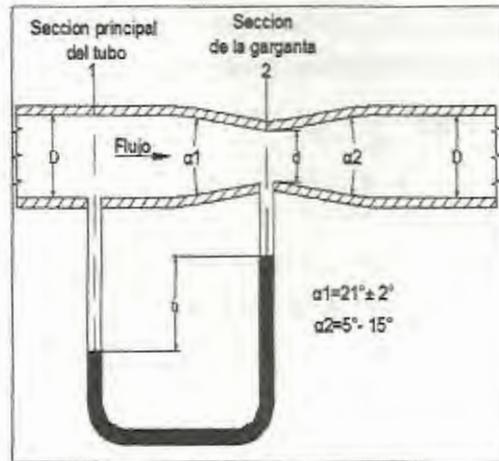


FIGURA 1. TUBO VENTURI

Una placa plana con un agujero de bordes afilados y un maquinado con precisión, recibe el nombre de orificio. Cuando se coloca en forma concéntrica dentro de un tubo, según se ilustra en la figura 2, hace que el flujo se contraiga de modo repentino conforme se acerca al orificio, y después que se expanda al regresar a todo el diámetro del tubo. La corriente que pasa a través del orificio forma una vena contracta y la velocidad rápida del flujo origina una disminución de la presión corriente abajo del orificio. Estos dispositivos, suele tener una β entre 0.2 y 0.8, aunque el diámetro d no debe ser menor de 12.5mm.

Donde;

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 3}$$

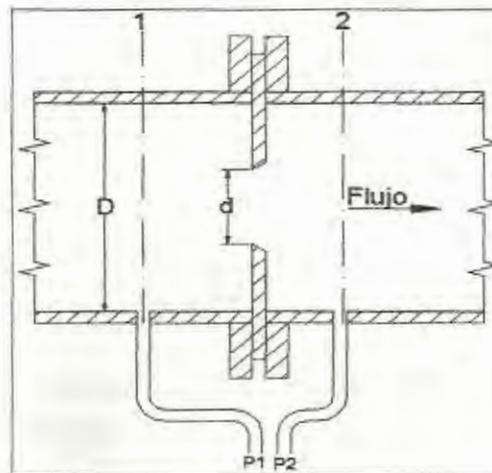


FIGURA 2. PLACA ORIFICIO

Para determinar el coeficiente de descarga, se emplea la ecuación de la energía (Ec. 4) y la continuidad (Ec.5). Con el empleo de las secciones 1 y 2 como puntos de referencia de la figura 1, se escribe las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad \text{Ec.4}$$

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2 \quad \text{Ec.5}$$

Estas ecuaciones sólo son válidas para fluidos incompresibles, es decir, líquidos. Por esta razón, la Ec. 4 puede simplificarse algebraicamente en:

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_f$$

$$u_2^2 - u_1^2 = 2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_f \right]$$

Pero $u_2^2 = u_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2$. Entonces, se tiene:

$$u_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right] = 2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_f \right]$$

$$u_1 = \frac{\sqrt{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - h_f \right]}}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1} \quad \text{Ec. 6}$$

A continuación se prosigue a realizar dos simplificaciones. En primer lugar, es común que el tubo Venturi se instale en posición horizontal, por lo que la diferencia de elevación $Z_1 - Z_2$ es igual a cero. En segundo lugar, el término h_f es la pérdida de energía del fluido conforme pasa de la sección 1 a la 2. El valor de h_f debe determinarse en forma experimental. Pero es más conveniente modificar la Ec.6 eliminando h_f e introduciendo un coeficiente de descarga C_d :

$$u_1 = C_d \frac{\sqrt{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right]}}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1} \quad \text{Ec. 7}$$

La Ec.7 se emplea para obtener la velocidad de flujo, pero se desea calcular el flujo volumétrico, entonces sabiendo que $Q = A_1 u_1$, tiene:

$$Q_r = C_d A_1 \sqrt{\frac{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right]}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \quad \text{Ec. 8}$$

El coeficiente de descarga C_d representa la relación de la velocidad real de energía a través del medidor de flujo, respecto a la velocidad ideal para un medidor de flujo sin ninguna pérdida de energía.

Por lo tanto, despejando el C_d , obtiene:

$$C_d = \frac{Q_r}{A_1 \sqrt{\frac{2g \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right]}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}}} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde;

Q_r : Representa al caudal real obtenido experimentalmente

Generalizado para cualquier medidor de flujo de carga variable y conociendo que $Q_r = A_1 V_r$ tiene:

$$C_d = \frac{v_r}{\sqrt{\frac{2 \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right]}{\frac{1}{\beta^4} - 1}}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde;

v_r : Velocidad real del fluido obtenido experimentalmente.

La expresión final de la Ec.10 en función del Número de Reynolds (N_r), se tiene;

$$C_d = \frac{Re \, v}{D \sqrt{\frac{2 \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right]}{\frac{1}{\beta^4} - 1}}} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde;

N_r : Número de Reynolds real del fluido obtenido experimentalmente.

ν : Viscosidad cinemática del fluido

Sabiendo que;

$$P_1 = \rho g h_a$$

$$P_2 = \rho g h_b$$

Y desarrollando el denominador dentro de la raíz se tiene;

$$C_d = \frac{Re v}{D_a \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(h_a - h_b)}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde;

$$\beta = \frac{D_b}{D_a} \quad \text{Ec. 13}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_r D_a}{v \rho A_a} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\dot{m}_r = \frac{m_{H_2O}}{t} = \text{flujo masico real} \quad \text{Ec. 15}$$

$$A_a = \frac{\pi D_a^2}{4} \quad \text{Ec. 16}$$

Todas estas fórmulas son para determinar el coeficiente de descarga del medidor Venturi, la misma metodología se usa para determinar el coeficiente de descarga del medidor placa orificio

(Investigar fundamentos de la mecánica de fluidos computacional)

Descripción del banco de pruebas:

El Banco de prueba está compuesto por dos equipos llamados TecEquipment H1 (Banco Hidráulico Gravimétrico) y TecEquipment H10 (Banco Medidor de Flujo).

TecEquipment H1 (Banco Hidráulico Gravimétrico)

El Banco Hidráulico gravimétrico (TecEquipment Gravimetric Hydraulic²⁰) suministra un flujo controlado de agua a varios equipos de laboratorio.

El banco hidráulico gravimétrico (figura 3) consta con un tanque sumidero con una bomba sumergible, un sistema de pesaje gravimétrico y una superficie de trabajo donde se colocan los otros equipos de laboratorio.

El sistema de pesaje gravimétrico consiste en un pequeño tanque interior en un brazo de pivote, que es equilibrado por unos pesos (incluidos en el banco) y que además poseen una relación de distancia respecto al pivote

²⁰ Datasheet TecEquipment H1

de 1:3 respectivamente. Para medir el flujo de agua, los usuarios usan un cronometro el cual empieza a contar cuando el brazo de pivote del tanque interior se encuentra horizontalmente; y el cronometro se detiene cuando este se levanta. Esto muestra que el peso del agua que se encuentra en el tanque interior es mayor al peso que se colocan al otro extremo del brazo.



FIGURA 3. BANCO HIDRÁULICO GRAVIMÉTRICO (TECQUIPMENT H1) SUMINISTRANDO FLUJO A UN EQUIPO EXPERIMENTAL¹.

TecQuipment H10 (Banco Medidor de Flujo)

Para la determinación del caudal en forma teórica y experimental y el correspondiente coeficiente de descarga empírico se empleará un equipo en forma de tablero (TecQuipment H10) provisto de los dispositivos de medición: tubo Venturi, difusor, placa orificio (manufacturada en conformidad con BSI042), codo de 90 grados y rotámetro, montados en ese mismo orden tal como se indica en la figura 4.3 cuya geometría y diámetros correspondientes, se encuentran en un esquema dibujado en el tablero del equipo (figura 4).



FIGURA 4 TECQUIPMENT H10 (BANCO MEDIDOR DE FLUJO)

Como puede observarse en la figura 5, el equipo de medición posee un juego de piezómetros cuyos orificios para toma de presión permiten obtener directamente la caída de presión a través de cada medidor, incluyendo la ganancia de presión en el difusor.

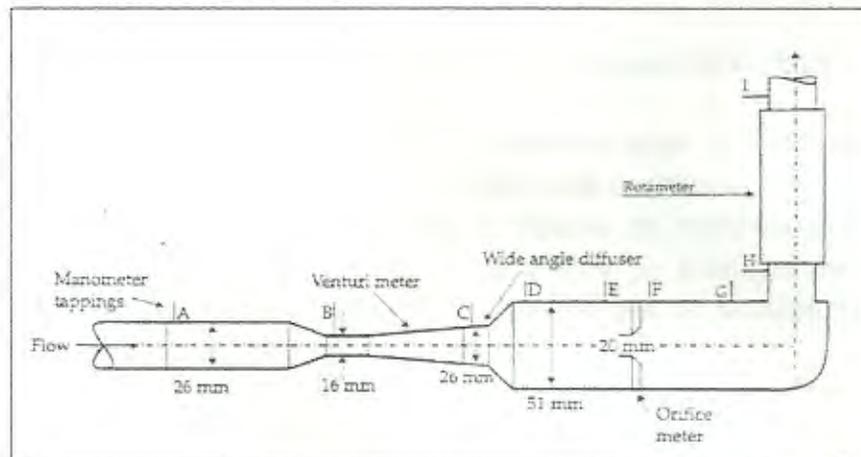


FIGURA 5 DIAGRAMA DEL BANCO MEDIDOR DE FLUJO (TECQUIPMENT H10) ²¹

Para este análisis CFD se utilizará el software ANSYS el cual posee a su vez varios programas de simulación para las distintas áreas ingenieriles como: civil, eléctrica, mecánica estructural, mecánica de fluidos y etc... Para el área ingenieril de mecánica de fluidos posee dos programas muy importantes, los cuales son CFX Y FLUENT. Para este estudio se utilizará el CFX.

²¹ Datasheet TecEquipment H10

El software ANSYS-CFX 14.5 posee varias características, pero entre las más importantes tiene:

- ✓ Mallas fijas o móviles (trasladantes o rotacionales).
- ✓ Flujo Sub-sónico, Tran-sónico e hiper-sónico.
- ✓ Reacciones químicas (Combustión).
- ✓ Multi-fase (combinaciones sólido + líquido + gas).
- ✓ Cambio de fase (Evaporación, Condensación, solidificación).
- ✓ Superficies libres (Canales abiertos).
- ✓ Flujo compresible e incompresible.
- ✓ Transferencia de calor: conducción, convección y radiación.
- ✓ Flujo de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos.
- ✓ Flujos estables e inestables.
- ✓ Flujo laminar y turbulento.
- ✓ Librerías de propiedades de fluidos.
- ✓ Post-procesamiento como: iso-superficies, mapas de contornos, líneas de flujo, trayectoria de partículas y animaciones.

Procedimiento experimental:

1. Verificar que la válvula de alimentación del banco hidráulico y la válvula de control (descarga), estén cerradas.
2. Abrir la válvula de control 1/3 de su apertura total (aproximadamente dos vueltas) y encender la bomba de alimentación del banco.
3. Abrir totalmente y en forma lenta la válvula de alimentación del banco; cuando el equipo esté lleno de agua y libre de burbujas de aire, cerrar totalmente la válvula de control de manera que el flotador del rotámetro descienda al tope inferior del tubo cónico.
4. Retirar la tapa del gusanillo que se encuentra en el extremo del tubo múltiple de vidrio, conecte la bomba manual de aire e introduzca el aire hasta que la altura de los piezómetros alcance 280 mm. en la escala del tablero.
5. Abrir la válvula de control de manera que el flotador del rotámetro se ubique en la primera altura indicada en la tabla de datos (22.5cm), proceder a medir las alturas de los piezómetros de los medidores: Venturi, y placa orificio.
6. Cerrar la válvula de paso de agua del tanque interior al sumidero y tomar el tiempo que tarda el brazo de pivote en levantarse. Para este experimento se utilizó solamente la pesa que viene soldada a la varilla que está sujeta al brazo, su peso es de 2.7 Kg.

7. Determinar el caudal real del banco hidráulico gravimétrico mediante el tiempo medido y el peso del agua del tanque interior (para este experimento es 8.1 kg).
8. Para obtener las demás alturas indicadas en la tabla de datos (tabla 1), cierre gradualmente la válvula de control hasta que el flotador del rotámetro se ubique en la posición correspondiente y repita el paso 6 y 7.
9. Finalizada la toma de datos apague el equipo de acuerdo a las instrucciones del Técnico del Laboratorio.

Procedimiento computacional:

1. Realizar el modelo tridimensional del volumen de fluido que se encuentra en el interior de los medidores. Cabe recalcar que las limitantes del volumen son la toma de presión a la entrada y salida de cada medidor. El modelo tridimensional se los puede realizar con cualquier programa CAD, y se los debe guardar en formato IGES (.igs). Ver anexo
2. Abrir WORKBENCH-ANSYS, luego en el Toolbox escoger CFX.



FIGURA 6. VENTANA DEL PROGRAMA ANSYS

3. Hacer clic en geometría e importar los archivos de formato IGES (.IGS)
4. Revisar que no haya algún tipo de discontinuidad en las superficies del modelo tridimensional importado, luego cerrar la ventana de geometría.
5. Hacer clic en Mesh, luego hacer clic en generate Mesh, luego en Details of Mesh, escoger sizing y escoger estos parámetros.



FIGURA 7. DETAILS OF MESH

6. Luego cerrar la ventana Mesh y hacer clic en Setup.
7. Al ingresar hacer clic en dominio del fluido, escoger Fluido continuo y presión de referencia 1 atm. Luego en modelos de fluido; escoger isotérmico y modelo de turbulencia k-e.
8. Hacer clic en aplicar para validar estos valores ingresados
9. Luego hacer clic derecho en dominio del fluido y seleccionar Boundary, crear en esta sección las fronteras de este modelo. Para Inlet se ingresara la presión estática que se obtiene experimentalmente y para outlet el flujo másico real; mientras que la pared se selecciona la condición no deslizable (ejemplo Venturi).
10. Estas expresiones permitirán determinar el coeficiente de descarga para cada medición.
 - ✓ $d = 0.016$ [m]
 - ✓ $D = 0.026$ [m]
 - ✓ $B = d/D$
 - ✓ Visc. = Dynamic Viscosity/Density
 - ✓ $mr = \text{massFlow()}@INLET$
 - ✓ Re (Número de Reynolds) = $(mr \cdot D) / (\text{Visc} \cdot \text{Density} \cdot \text{área})@INLET$
 - ✓ $H1 = (\text{AreaAve(Pressure)}@INLET - 101325 \text{ [Pa]}) / (\text{Density} \cdot g)$
 - ✓ $H2 = (\text{AreaAve(Pressure)}@OUTLET - 101325 \text{ [Pa]}) / (\text{Density} \cdot g)$
 - ✓ $E1 = (Nr \cdot \text{Visc.}) / (D \cdot (B^2))$
 - ✓ $E2 = (1 - (B^4)) / (2 \cdot g \cdot (H1 - H2))$
 - ✓ Cd (Coeficiente de descarga) = $E1 \cdot (E2^{0.5})$

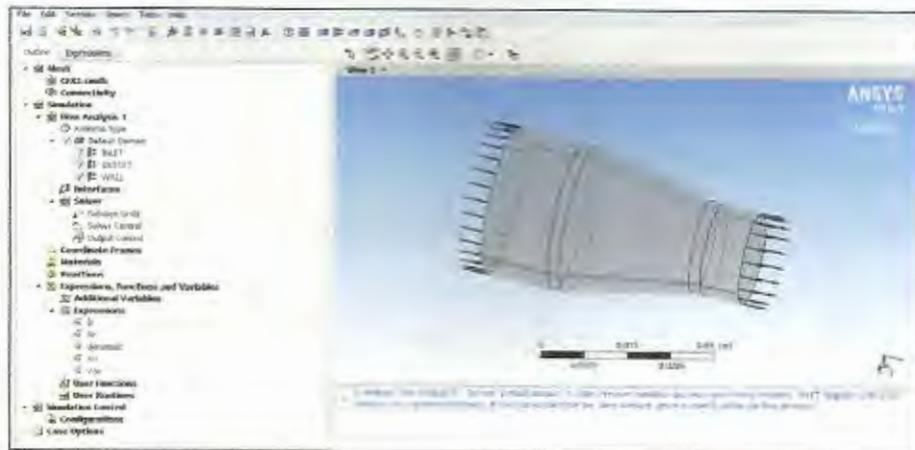


FIGURA 8. VENTANA SETUP

11. Luego cerrar la ventana Setup y hacer clic en solution. Después hacer clic en Run. Al converger las soluciones cerrar solution y abrir la ventana resultados. En esta sección se crean los contornos de presión y velocidad de los modelos, además de otras variables que se pueden obtener.

Para mayor comprensión se muestra el siguiente diagrama de flujo que explica el procedimiento computacional:

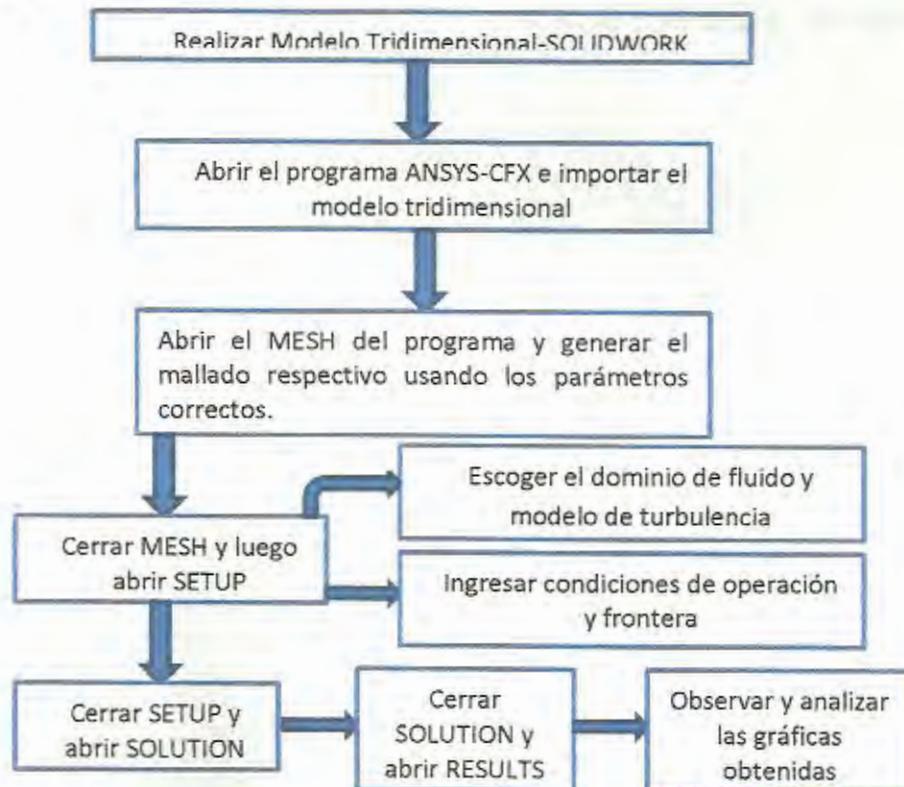


Tabla de datos:

TABLA 1.
DATOS EXPERIMENTALES

Prueba	Altura rotámetro (cm)	h_a (mm)	h_b (mm)	h_e (mm)	h_f (mm)	masa	
						H ₂ O (kg)	t (s)
1	22.5					8.1	
2	20.6					8.1	
3	18.8					8.1	
4	17.4					8.1	
5	15.5					8.1	
6	14.1					8.1	
7	12.5					8.1	
8	10.7					8.1	
9	9.6					8.1	

Cálculos:

1. Para cada medición se determinará el coeficiente de descarga y número de Reynolds, usando las siguientes ecuaciones:

$$C_d = \frac{Re \, v}{D_a \beta^2} \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{2g(h_a - h_b)}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde;

$$\beta = \frac{D_b}{D_a} \quad \text{Ec. 13}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_r D_a}{v \rho A_a} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\dot{m}_r = \frac{m_{H_2O}}{t} = \text{flujo masico real} \quad \text{Ec. 15}$$

$$A_a = \frac{\pi D_a^2}{4} \quad \text{Ec. 16}$$

Gráficos:

- ✓ Gráficos de contorno de velocidad de cada medición
- ✓ Gráficos de contorno de presión de cada medición
- ✓ Grafico Coeficiente de descarga vs Número de Reynolds experimentalmente – (mediante técnicas de regresión)
- ✓ Grafico Coeficiente de descarga vs Número de Reynolds CFD

Análisis de resultados:

- ✓ Analizar el comportamiento de la velocidad y presión a diferente flujo.
- ✓ Analizar los errores propagados en los resultados obtenidos experimentalmente.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos mediante CFD y experimentalmente.

Conclusiones y recomendaciones:

Bibliografía:

- L.Mott, R. (2006). *Mecanica de Fluidos* (Sexta ed.). Mexico: Pearson.
- Shames, I. H. (1995). *Mecanica de Fluidos* (tercera ed.). New-York: McGRAW-HILL.
- Datasheet TecQuipment H10. England
- Datasheet TecQuipment H1. England
- International Standard ISO 2186, first edition.
- B.S. 1042: Part 1: Methods for the measurement of fluid flow in pipes.

Anexo

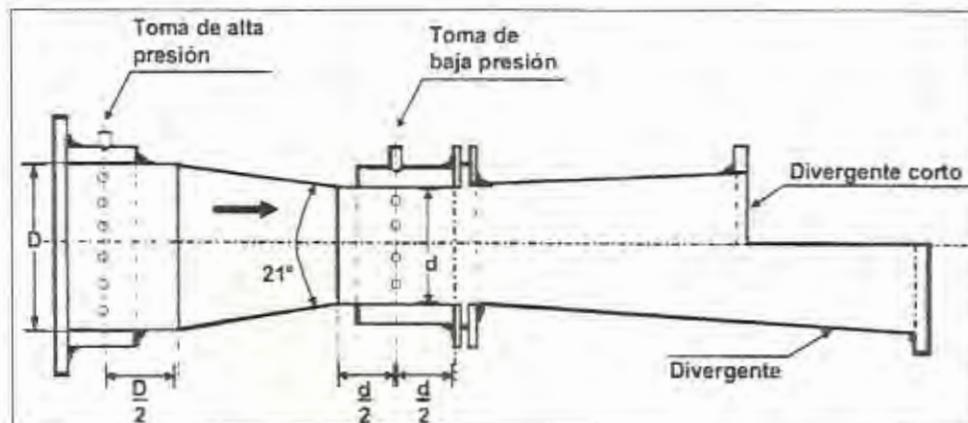


FIGURA 9. DIMENSIONES CONSTRUCTIVAS PARA EL MEDIDOR TUBO VENTURI

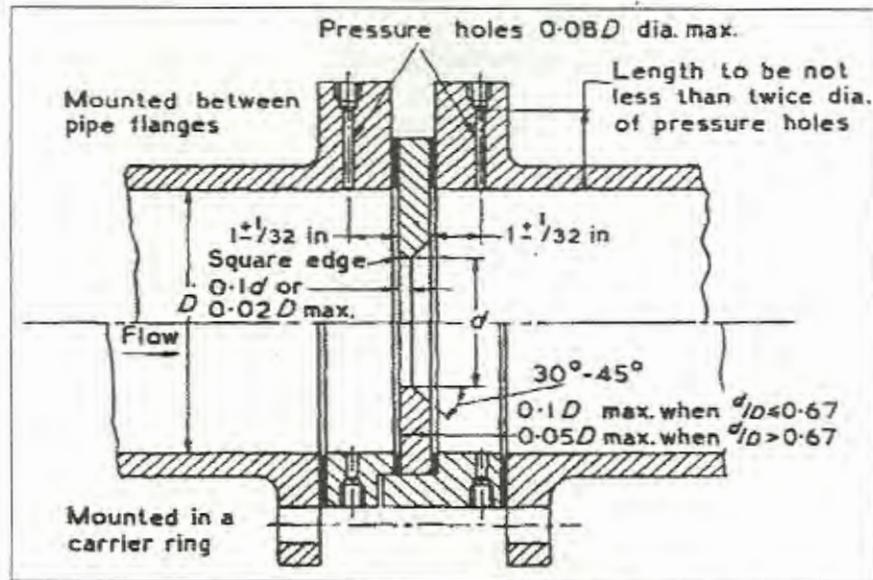


FIGURA 10 DIMENSIONES CONSTRUCTIVAS PARA EL MEDIDOR PLACA ORIFICIO

BIBLIOGRAFIA

1. B.S. 1042: Part 1: Methods for the measurement of fluid flow in pipes.
2. CFX, A. (2009). Computational Fluid Dynamics, Release 10.0: Intro_CFD Concepts.
3. Datasheet TecQuipment H1, hydraulics apparatus, England.
4. Datasheet TecQuipment H10, flow measuring apparatus, England.
5. Espinoza, H. (2008). "Elaboracion de un modelo Cfd de un generador eolico y validacion experimental". Tesis. Escuela Superior Politecnica del Litoral.
6. Inc., A. (2005). "ANSYS CFX -Solver, Release 10.0: Modelling (CFX Mod.book pdf)".
7. John D. Anderson, J. (1995). *Computational Fluid Dinamics*. New York: McGraw-Hill,Inc.
8. L.Mott, R. (2006). *Mecanica de Fluidos* (Sexta ed.). Mexico: Pearson.
9. Mecánica de Fluidos. Frank M. White. Apéndice A. Tabla A.1.
10. Ramajo, I. D. (2010). "Simulacion computacional de los procesos fluido-dinamicos en el interior de motores de combustion interna". Tesis. Universidad Nacional del Litoral.
11. Shames, I. H. (1995). *Mecanica de Fluidos* (tercera ed.). New-York: McGRAW-HILL