



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DEL FENÓMENO
DECAVITACIÓN EN VÁLVULAS
HIDRÁULICAS DE CORTE
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE
APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD**

Autores:

Rickarlo Duran
Alexander Torres

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



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

**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN VÁLVULAS
HIDRÁULICAS DE CORTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE
APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD.**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO.

Autores:

Rickarlo Duran
Alexander Torres

Tutor: Ing. Gruber Caraballo

San Diego, Mayo 2019



FI-M -008-2019-ICR

Valencia, 14 de Marzo de 2019

Ciudadano:
Rickarlo Durán
C.I:26.019.045
Alexander Torres
C.I:26.161.534
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 14-03-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN VÁLVULAS HIDRÁULICAS DE CORTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD** presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo, C.I: 12.014.408 y la Ing. Alicia Yáñez, C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos que los asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Prof. Luis Lira
Decano de la Facultad de Ingeniería

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

L/lc.



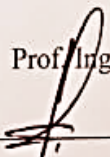
REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

San Diego, Mayo 2019

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, GRUBER A. CARABALLO V. , portador(a) de la cédula de identidad N° V-12014408 , hace constar que he leído el Proyecto del Trabajo de Grado, presentado por el ciudadano (a) ALEXANDER MANUEL, TORRES GARCIA portador(a) de la cédula de identidad N° V-26.161.534, y RICKARLO ANDRÉS, DURAN ATENCIO portador(a) de la cédula de identidad N° V-26.019.045 titulado ESTUDIO DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN VÁLVULAS HIDRÁULICAS DE CORTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero MECÁNICO , y acepta la tutoría del mencionado Proyecto durante su etapa de desarrollo hasta su elaboración y evaluación; según las condiciones de la Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad José Antonio Páez y sus correspondientes Reglamentos.

Prof. Ing. Gruber A. Caraballo V.


Firma

05 Junio 2019
Fecha

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por ser nuestro guía, por darnos sabiduría para alcanzar nuestros sueños y seguridad para lograr nuestro cometido cada día y hacer lo correcto.

A nuestros padres, por apoyarnos, orientarnos y brindarnos amor y auxilio en este y todos los momentos de nuestras vidas, por el increíble apoyo durante la carrera, sin ellos no hubiese sido posible la culminación de este trabajo de investigación.

Agradecemos al Ing. Gruber Caraballo, por ser nuestro tutor académico y aceptar el compromiso de guiarnos en la realización del presente trabajo, ya que con su ayuda, conocimientos, consejos e incondicional apoyo fue posible llevar a cabo la investigación de una manera correcta.

De igual manera agradecemos a todas aquellas personas que intervinieron en esta investigación tanto directa como indirectamente, amigos y profesores, quienes en todo momento estuvieron atentos y prestaron colaboración y orientación.

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad
Re	Número de Reynolds	Adimensional
\bar{v}	Velocidad media de flujo	m/s
D	Diámetro nominal de la tubería	mm

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
NOMENCLATURA	vi
ÍNDICES DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xvii
ÍNDICE DE CUADROS	xix
RESUMENINFORMATIVO	xx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Formulación del Problema.....	8
1.3 Objetivos de la Investigación.....	9
1.3.1 Objetivo General.....	9
1.3.2 Objetivos Específico.....	9
1.4 Justificación.....	9
1.5 Alcance.....	9
II MARCOTEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Bases Teóricas.....	15
2.2.1 Régimen de Flujo: Laminar y Turbulento.....	15
2.2.2 Pérdida de Presión en Válvulas y Accesorios.....	17
2.2.3 Flujo turbulento.....	20
2.2.3.1 Perfil de Velocidad.....	21
2.2.4 Flujo másico.....	22
2.2.5 Válvulas de Corte.....	22
2.2.5.1 Válvulas de Bola.....	24
2.2.5.2 Válvulas de Globo.....	25
2.2.5.3 Válvulas de Compuerta.....	27
2.2.6 Cavitación.....	29
2.2.6.1 Factores que intervienen en la Cavitación.....	30
2.2.6.2 Etapas de la Cavitación.....	30
2.2.6.3 Tipos de Cavitación.....	32

2.2.7	Metodología CFD.....	33
2.2.7.1	Ecuaciones de Movimiento.....	34
2.2.7.2	Geometría CAD.....	35
2.2.7.3	Mallado.....	35
2.2.7.4	Validación de las Características de la Geometría y Mallado.....	41
2.2.7.5	Discretización.....	42
2.2.7.6	Condiciones de frontera.....	44
2.2.7.7	Modelo de Turbulencia.....	46
2.2.7.8	Convergencia de la Simulación por criterio de RMS.....	50
2.3	Definición de Términos Básicos.....	51

III MARCO METODOLÓGICO

3.1	Naturaleza de la Investigación.....	53
3.2	Tipo de Investigación.....	54
3.3	Nivel de Investigación.....	54
3.4	Diseño de investigación.....	55
3.5	Población y muestra.....	56
3.5.1	Población.....	56
3.5.2	Muestra.....	57
3.6	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	57
3.7	Fases de la Investigación.....	58

IV RESULTADOS

4.1	Revisión de documentos bibliográficos acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo y en la aparición de cavitación en válvulas hidráulicas de corte.....	61
4.2	Selección de válvulas reales e identificación de sus características geométricas para el modelado mediante una herramienta CAD.....	62
4.2.1	Diseño CAD de las válvulas.....	62
4.2.2	Obtención del dominio fluidizado en cada válvula.....	65
4.2.2.1	Dominio Fluidizado - Válvula de Bola.....	65
4.2.2.2	Dominio Fluidizado - Válvula de Compuerta.....	65
4.2.2.3	Dominio Fluidizado - Válvula de Asiento Cónico	66
4.2.3	Importación de las geometrías de los dominios.....	67
4.3	Simulación del campo de flujo a través de las válvulas seleccionadas mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional	67

(CFD).....	67
4.3.1 Selección de modelos matemáticos para la solución.....	67
4.3.2 Preparación de las herramientas en ANSYS® Workbench...	68
4.3.3 Discretización espacial del dominio (Mallado).....	68
4.3.3.1 Definición de superficies del dominio.....	69
4.3.3.2 Configuración del Mallado.....	70
4.3.4 Validación de las características de la Geometría y Mallado	74
4.3.5 Condiciones de frontera.....	75
4.3.6 Configuración de la herramienta de cálculo “Solver”.....	78
4.3.7 Inicio de la secuencia de cálculo y solución de la simulación.....	79
4.4 Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis.....	80
4.4.1 Convergencia de la simulación.....	81
4.4.2 Visualización de resultados.....	84
4.4.2.1 Dominio Fluidizado de Válvula de Bola.....	84
4.4.2.2 Dominio Fluidizado de Válvula de Compuerta...	100
4.4.2.3 Dominio Fluidizado de Válvula de Asiento Cónico.....	115
CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES	132
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	133
APÉNDICE	138
ANEXO I	165

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO

FIGURA

		pp.
1	Comportamiento de un fluido, donde se observa los flujos laminar y turbulento.....	15
2	Perfil de velocidad, desarrollado en flujo laminar y en flujo turbulento.....	21
3	Resistencia de válvulas y acoplamiento.....	23
4	Válvula de Bola.....	24
5	Geometría interna de una válvula de Bola.....	25
6	Válvula de asiento cónico.....	26
7	Geometría interna de una válvula de asiento cónico.....	26
8	Coefficiente K para válvula de globo.....	27
9	Válvula de compuerta.....	28
10	Geometría interna de la válvula de compuerta.....	28
11	Coefficiente K para válvula de compuerta.....	29
12	Etapas de la Cavitación.....	30
13	Colapso de la burbuja con la subsiguiente formación del Jet.....	31
14	Supercavitación.....	32
15	Pasos para resolver numéricamente un problema con CFD.....	34
16	(a) SolidWorks, (b) Inventor.....	35
17	Ejemplo de malla estructurada bidimensional. La malla tiene nueve nodos y ocho intervalos en los lados superior e inferior, y cinco nodos y cuatro intervalos en los lados izquierdo y derecho	36
18	Malla Estructurada formada por hexaedros.....	37
19	Ejemplo de mallas no estructuradas bidimensionales. La malla tiene nueve nodos y ocho intervalos en los lados superior e inferior, y cinco nodos y cuatro intervalos en los lados izquierdo y derecho.....	37
20	Malla no estructurada formada por tetraedros.....	38
21	Ejemplos de mallas estructuradas generadas para el análisis de bloques múltiples de CFD.....	39
22	Malla de bloques múltiples de la figura 23(a) modificada para un paquete CFD que maneja sólo bloques elementales.....	39
23	Malla híbrida de elementos no estructurados con elementos estructurados.....	40
24	Malla híbrida bidimensional en cercanía a una superficie curva.....	40
25	Condición de salida con gradiente cero.....	45
26	La condición de frontera de ventilador impone un cambio abrupto en la presión a través del plano del ventilador para simular un ventilador de flujo	46

	axial en un conducto.....	
27	Flujo turbulento.....	47
28	Simplificación del campo de flujo para una simulación SRG.....	48
29	Consideraciones promedio para el modelo de turbulencia en análisis DFC. Se muestra un perfil de velocidad promedio. No hay remolinos turbulentos calculados.....	49
30	Geometría CAD de la Válvula de bola.....	63
31	Sección de la Geometría CAD de la Válvula de Bola.....	63
32	Geometría CAD de la Válvula de Compuerta.....	63
33	Sección de la Geometría CAD de la Válvula de Compuerta.....	64
34	Geometría CAD de la Válvula de Asiento Cónico.....	64
35	Sección de la Geometría CAD de la Válvula de Asiento Cónico.....	64
36	Dominio fluidizado de la válvula de bola con 25% de apertura.....	65
37	Dominio fluidizado de la válvula de compuerta con 25% de apertura.....	66
38	Dominio fluidizado de la válvula de Asiento cónico con 25% de apertura...	66
39	Dominio fluidizado en ANSYS® Workbench.....	67
40	Esquema del proyecto en ANSYS® Workbench.....	68
41	Programa para configurar el mallado en ANSYS® Workbench.....	69
42	Sección de entrada “Inlet”.....	69
43	Pared “Wall”.....	70
44	Sección de salida “Outlet”.....	70
45	Mallado ideal propuesto por ANSYS®.....	71
46	Sección longitudinal del mallado ideal propuesto por ANSYS®.....	72
47	Mallado refinado del dominio válvula de compuerta con 50% de apertura...	73
48	Sección longitudinal del mallado refinado del dominio válvula de compuerta con 50% de apertura.....	73
49	Herramienta para configurar las condiciones de frontera.....	75
50	Configuración de Solver.....	78
51	Parámetros del Solver.....	79
52	Herramienta Solution.....	80
53	Inicio del ciclo de cálculo de la simulación.....	80

Dominio Fluidizado de la Válvula de Bola

P salida = 6332Pa

54	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	85
55	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	85
56	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	86
57	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	86
58	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	87
59	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	87

P salida = 4749Pa

60	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	89
61	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	90
62	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	90
63	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	90
64	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	91
65	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	91

P salida = 3166Pa

66	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	93
67	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	94
68	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	94
69	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	94
70	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	95
71	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	95

	Comportamiento de líneas de flujo	
72	Apertura 25%.....	98
73	Apertura 50%.....	99
74	Apertura 75%.....	99
	Dominio Fluidizado de la Válvula de Compuerta	
	P salida = 6332Pa	
75	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	100
76	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	100
77	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	101
78	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	101
79	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	102
80	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	102
	P salida = 4749Pa	
81	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	104
82	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	105
83	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	105
84	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	105
85	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	106
86	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	106
	P salida = 3166Pa	
87	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	108
88	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	109
89	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	109
90	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	109
91	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	110

92	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	110
	Comportamiento de líneas de flujo	
93	Apertura 25%.....	113
94	Apertura 50%.....	114
95	Apertura 75%.....	114
	Dominio Fluidizado de la Válvula de Asiento Cónico	
	P salida = 6332Pa	
96	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	115
97	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	115
98	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	116
99	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	116
100	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	117
101	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	117
	P salida = 4749Pa	
102	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	119
103	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	120
104	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	120
105	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	120
106	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	121
107	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	121
	P salida = 3166Pa	
108	Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	123
109	Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	124
110	Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	124
111	Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%....	124

112	Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	125
113	Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.....	125
	Comportamiento de líneas de flujo	
114	Apertura 25%.....	128
115	Apertura 50%.....	129
116	Apertura 75%.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO		pp.
TABLAS		
1	Régimen de Flujo de acuerdo al Número de Reynolds.....	17
2	Resultados de Verificación de Geometría y Mallado.....	74

ÍNDICE DE GRÁFICAS

CONTENIDO GRÁFICA	pp.
1	Convergencia de las ecuaciones de Masa y Momento para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 50% de apertura, $P_{\text{salida}} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$ 81
2	Convergencia del modelo de turbulencia k -épsilon para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 50% de apertura, $P_{\text{salida}} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$ 82
3	Convergencia de las ecuaciones de Masa y Momento para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 25% de apertura, $P_{\text{salida}} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$ 83
4	Convergencia del modelo de turbulencia k -épsilon para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 25% de apertura, $P_{\text{salida}} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$ 83
Dominio Fluidizado de la Válvula de Bola	
P salida = 6332Pa	
5	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 88
6	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 88
7	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 89
P salida 4749Pa	
8	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 92
9	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 92
10	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 93
P salida 3166Pa	
11	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde) 96
12	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde) 96
13	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde). 97
Dominio Fluidizado de la Válvula de Compuerta	
P salida = 6332Pa	
14	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)..... 103

15	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)	103
16	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde)	104
P salida 4749Pa		
17	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	107
18	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	107
19	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	108
P salida 3166Pa		
20	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	111
21	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	111
22	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	112
Dominio Fluidizado de la Válvula de Asiento Cónico		
P salida = 6332Pa		
23	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	118
24	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	118
25	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	119
P salida 4749Pa		
26	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	122
27	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	122
28	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	123
P salida 3166Pa		
29	Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	126
30	Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	126
31	Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).....	127

ÍNDICE DE CUADROS

CONTENIDO CUADRO		pp.
1	Ventajas y Desventajas de la válvula de Bola.....	24
2	Ventajas y Desventajas de la válvula de Globo.....	25
3	Ventajas y Desventajas de la válvula de compuerta.....	27
4	Parámetros del mallado ideal propuesto por ANSYS®.....	71
5	Parámetros del refinamiento de Mallado.....	72
6	Parámetros para Pre – simulador.....	75
7	Condiciones de frontera para dominio de válvula de compuerta 50% apertura, $P_1 = 6332\text{Pa}$	77



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

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN VÁLVULAS HIDRÁULICAS DE CORTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD.

Autor:

Duran, Rickarlo

Torres, Alexander

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V

Fecha: Mayo, 2019

RESUMEN INFORMATIVO

El presente trabajo tiene como objetivo el “estudio del fenómeno de cavitación en válvulas hidráulicas de corte utilizando la técnica de aproximación numérica CFD”, se enfocaron entender el comportamiento del fluido a través de válvulas de corte, las variables que intervienen en este, así como también el fenómeno cavitación. Dicho análisis se llevó a cabo con aplicación de técnicas de aproximación numérica CFD e investigaciones previas, en esta investigación se desarrolló una simulación del flujo a través de las válvulas de corte escogidas para estudiar el fenómeno de cavitación. Inicialmente se definió la problemática que trae consigo el desarrollo de este estudio, seguidamente se realizó una recopilación de información sobre el tema, luego mediante una herramienta CAD se modelaron las válvulas escogidas, por consiguiente, se realizó la simulación del campo de flujo a través de estas con el Software ANSYS® WORKBENCH bajo los parámetros de flujo escogidos, por último, se muestran los resultados obtenidos luego de la simulación para luego dar explicación de lo ocurrido. Se determinó el comportamiento del flujo al variar la posición del obturador en cada válvula y como crece el porcentaje de vapor al obstruir el paso del flujo. Al final del análisis se demostró que la válvula de asiento cónico es la que presenta menor grado de cavitación en comparación con la válvula de bola y de compuerta.

Palabras clave: Cavitación, Dinámica de fluidos computacional (CFD),

Mecánica de fluidos, Válvulas de corte, Simulación.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las industrias se han visto afectadas por el crecimiento de la demanda actual de la sociedad, haciendo que estas tengan que realizar modificaciones, requiriendo equipos y accesorios de mayor eficiencia y durabilidad, esto ha generado retos de ingeniería respecto a la mejora en el diseño de estos componentes y en algunas líneas de procesos. Una de las partes fundamentales que tienen que ser modificadas constantemente para el funcionamiento de una planta son las redes de flujos, las cuales son esenciales para alimentación de equipos, procesos, etc.

Para la correcta manipulación del flujo a través de la red de tuberías es necesario disponer una serie de elementos, además de los segmentos de tuberías, accesorios y equipos adicionales los cuales permiten el control del flujo, siendo algunos de ellos, Bombas, Válvulas, Codos, Manómetros, Medidores de caudal, entre otros.

Las válvulas son accesorios importantes y necesarios en cualquier red instalada, estas permiten la regulación y control del flujo que pasa a través de sí misma, la cual favorece al proceso que se esté realizando los cuales pueden ser: transmisión de fuerza, torque, intercambio de energía o sencillamente llevar el fluido de un lugar a otro. Dentro de este grupo de accesorios se encontraron unos tipos de válvulas utilizados muy frecuentemente en la industria, las cuales son válvulas de corte que poseen la característica de interrupción y paso libre del fluido de manera rápida y eficaz.

Asimismo, éstas tienden con mayor frecuencia a sufrir desgaste por situaciones o fenómenos que se presentan en la red siendo uno de estos la cavitación, el cual es un proceso en el que un líquido en determinadas condiciones pasa a estado gaseoso y un momento después pasa a estado líquido nuevamente, esto se da con una disminución de la presión del fluido por debajo de la presión de vapor y luego un

incremento de la presión nuevamente, lo que trae consigo una serie de consecuencias que afectan la vida útil de los elementos que conforman la red de distribución.

La presente investigación busca estudiar este fenómeno, las variables que intervienen en el proceso, cuándo ocurre en las válvulas hidráulicas de tipo corte, ya que realizar estos estudios de forma experimental es algo costoso por los equipos que se requieren, así como lo son la implementación de bancos de pruebas, las válvulas que se requieren para los ensayos, tiempo de ingeniería para efectuar estos, entre otras cosas.

Gracias a los avances tecnológicos se ha venido implementando la utilización de programas de simulación numérica de fenómenos físicos en fluidos o mejor conocido como Dinámica de Fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés), que permite analizar situaciones de distintos tipos de fluidos, para ver como interaccionan estos con cuerpos sólidos. El cual implica la resolución de ecuaciones diferenciales mediante el uso de computadoras, permitiendo el estudio detallado de fenómenos cada vez más complejos.

Estos programas son una gran herramienta para estos casos, realizar la simulación de fluido a través de un elemento en diversas situaciones facilita la obtención de información, reduciendo gastos tanto en implementación de bancos de pruebas y de tiempo en la realización de los diversos ensayos, de esta mane a hacer posible el cumplimiento de los objetivos.

En la siguiente investigación se realizarán simulaciones en distintos tipos de válvulas hidráulica de tipo corte utilizando la técnica de aproximación numérica para estudiar el fenómeno de cavitación, así como también las variables que intervienen en el comportamiento del flujo a través de estas, con el fin de obtener información en forma de datos, gráficos y videos de lo que sucede con la ayuda de la herramienta CFD, para su posterior análisis.

La investigación ha sido desarrollada de forma secuencial y se contempla de la siguiente manera:

El capítulo I, se plantea la formulación del problema a estudiar y se establece el objetivo general y los objetivos específicos para el desarrollo de la investigación, la justificación y el alcance de la misma.

El capítulo II, se ve conformado por los antecedentes que contribuyen con información y datos para el desarrollo de la investigación, de igual manera se plasmaron las bases teóricas correspondientes que se deben manejar para la elaboración y entendimiento de lo realizado, tipos de válvulas y fundamentos teóricos de la herramienta CFD.

El capítulo III, describe la metodología a emplear en el desarrollo de la investigación, los pasos que son planteados, todas aquellas características referentes al marco metodológico, se explica el enfoque que posee la investigación, se justifica el tipo de investigación, el nivel de la investigación, el diseño en el que se ve enmarcada, la población y muestra, por último, las fases que caracterizan a la investigación.

El capítulo IV, se expondrán los resultados de las simulaciones en forma de gráficos, tablas, figuras y videos con el respectivo análisis del fenómeno en estudio. Se describe el comportamiento de las variables que caracterizan el flujo a través de las diferentes válvulas.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1.Planteamiento del Problema.

Debido a los avances tecnológicos logrados con el pasar del tiempo los procesos industriales cada vez requieren equipos y accesorios de mayor eficiencia y durabilidad, esto ha originado retos en la ingeniería respecto a la mejora en el diseño de estos componentes. Conforme se dan estos avances, los procesos industriales a su vez se vuelven más complejos y con ello aumenta la importancia del manejo de fluidos en las máquinas.

Asimismo, desde hace muchos años el aprovechamiento y administración del agua ha sido siempre importante, por ende, han surgido numerosas medidas materiales y administrativas destinadas a regular su distribución y utilización (Nace, R. 1970. p. 9). Siendo algunas de ellas, implementación de redes de distribución las cuales están integradas por sistemas de tuberías por las que circula el fluido e instalación de puntos de bombeo para garantizar un flujo continuo a lo largo de toda la red. Aclarando que estos sistemas se aplican tanto en viviendas o en sistemas de procesos industriales.

Evidentemente, para garantizar el flujo de agua a través de la red es necesario disponer, además de los segmentos de tuberías, de una serie de accesorios y equipos adicionales los cuales permitirán el control directo sobre el flujo, siendo algunos de ellos, Bombas, Válvulas, Codos, Tees, Manómetros, Medidores de caudal, entre otros, cada uno de ellos cumpliendo con una función específica.

Las válvulas son accesorios que se utilizan para regular y controlar el flujo del fluido en tuberías, este flujo puede ser cero (válvula cerrada), máximo (válvula abierta) cualquier posición intermedia. (Uribe, A. 2009. p. 19). Siendo las más

utilizadas en la industria las válvulas de corte, que permiten la interrupción y paso libre del fluido de manera rápida.

En primer lugar, cuando un fluido pasa a través de una válvula se produce una pérdida de carga o pérdida de energía, lo cual es un aspecto muy tomado en consideración puesto a que los procesos a nivel mundial cada vez exigen el incremento de eficiencia energética de los equipos y sistemas por lo que la reducción de estas pérdidas es el principal objetivo de mejoras.

En segundo lugar, en algunas turbomáquinas se instalan válvulas en las tuberías de succión y al pasar el fluido por la válvula se produce una distorsión lo que trae consigo la disminución del rendimiento de la máquina puesto a que generalmente estas máquinas se diseñan en condiciones de flujo ideales sin tomar en consideración los efectos de esas distorsiones.

Además de esto, en la actualidad existe una gran cantidad de procesos industriales los cuales están integrados por una o más redes de tuberías para el transporte de algún fluido ya sea para transmitir fuerza, calor, intercambio de energía o simplemente llevar el fluido de un lugar a otro. Los cuales a su vez son cada vez más exigentes y requieren de equipos capaces de soportar las exigencias del sistema.

Como resultado de la ejecución de estas actividades el fluido es sometido a diversas condiciones y se puede dar el caso de que se produzcan una serie de fenómenos que pueden provocar daños a los elementos que integran la red, uno de ellos es la Cavitación, la cual es según Marchegiani, A. (2006)

La formación de bolsas localizadas de vapor dentro del líquido, pero casi siempre en las proximidades de las superficies sólidas que limitan el líquido. En contraste con la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de calor o por una relación de la presión estática ambiente del líquido, la Cavitación es una vaporización local del líquido, inducido por una reducción hidrodinámica de la presión. (p. 1).

Este fenómeno básicamente es un proceso en el cual un líquido en determinadas condiciones pasa a estado gaseoso y un momento después pasa a estado líquido nuevamente, esto se da con una disminución de la presión del fluido por debajo de la

presión de vapor y luego un incremento de la presión nuevamente, lo cual trae consigo una serie de consecuencias que afectan la vida útil de los elementos que conforman la red de distribución.

Ahora bien, durante el proceso de Cavitación, en el fluido se forman burbujas de vapor de agua las cuales se originan por la caída de presión que produce un cambio brusco de la sección por la cual fluye el fluido o también por la existencia de zonas de baja presión. Conforme avanza el fluido la presión va aumentando gradualmente hasta alcanzar el valor de operación de la red, al encontrarse la burbuja dentro de esta zona de alta presión esta comienza a pasar nuevamente a estado líquido entonces colapsa súbitamente, o Implota, lo que produce que el agua que las rodea se acelere hacia el interior de la misma formando una especie de hendidura. Esto origina un “Microchorro” que golpea las paredes de la superficie limitante a muy alta velocidad ($V > 1000$ m/seg), causando picos de presión de hasta 10.000 bar.

Debido a esto, se originan una serie de efectos y consecuencias que son indeseables y afectan tanto el flujo y la superficie limitante del fluido, en primer lugar, se produce un Bloqueo, lo cual es producto del espacio que ocupan las burbujas disminuyendo la sección por donde circula el fluido resultando en un aumento de la velocidad y, por lo tanto, la presión disminuye aún más. Seguidamente la cavitación produce una disminución del rendimiento del elemento por el cual se hace pasar el fluido, ya sea una bomba, turbina, válvula, etc., esto debido a la alteración o inestabilidad del flujo en ese trayecto.

Por otra parte, se presentan consecuencias que afectan directamente la integridad estructural del elemento, siendo en primer lugar, Vibraciones y Ruido, los cuales son producto del colapso de las burbujas puesto a que se produce un fenómeno vibratorio que se transmite a través de los conductos o estructura y produce molestas oscilaciones y ruidos, esto resultando peligroso si la frecuencia de estas oscilaciones entra en resonancia con alguna frecuencia propia de la estructura, causando así una falla.

Además de ello, se produce en el material de la superficie limitante cierto desgaste o lo que se conoce también como Erosión por Cavitación, siendo éste el efecto más indeseado de la cavitación, esto es producto de la alta presión que se produce al momento de la implosión de la burbuja lo que origina un microchorro, previamente mencionado, el cual produce el efecto de martillo sobre la superficie del material originando deformación sobre el mismo y el posterior desprendimiento del material. Siendo esto causas suficientes para tomar medidas a fin de evitar o establecer un control sobre la aparición de este fenómeno de cavitación.

Asimismo, el cuerpo de una válvula puede tener zonas de baja presión producto de los cambios de sección transversal o perfiles puntiagudos dentro del conducto de la misma, además de esto, también se debe considerar la geometría interna propia de la válvula, la cual puede presentar ciertos defectos no tomados en consideración al momento del diseño y posterior fabricación de la misma, estos factores pueden traer consigo la aparición de cavitación.

Por ello se ha dado la necesidad de implementar métodos para poder estudiar con detalle el campo de flujo a través de cualquier equipo o elemento instalado en una red de tuberías para el manejo de fluidos, antiguamente se recurría al “Ensayo y Error”, debido a las limitaciones tecnológicas era el único método al cual se podía recurrir para estudiar estos componentes. Conforme fue avanzando la ciencia, la tecnología y la necesidad de la optimización en el diseño de estos componentes se fueron creando otros métodos con resultados más rápidos y precisos.

En primer lugar, está el manejo de complejas ecuaciones matemáticas las cuales analizan el fluido a través de volúmenes de control infinitesimales aplicando ecuaciones de continuidad y la mayormente utilizada para resolver problemas de mecánica de fluidos en ingeniería, la Ecuación de Navier-Stokes, la cual es la base de la mecánica de fluidos y, de hecho, muchos investigadores han dedicado sus estudios para intentar resolver esta ecuación.

Evidentemente, optar por este método para resolver problemas de mecánica de fluidos en ingeniería resulta un poco complicado puesto a que se necesitarían

personas con amplios conocimientos en mecánica de fluidos, física y matemática que puedan llevar a cabo la solución de las ecuaciones. Además de que requiere tiempo para el planteamiento de las ecuaciones y su posterior resolución, esto acompañado de la posible aparición de errores en el manejo de las ecuaciones, lo que resulta poco viable para efectos prácticos ya que en la industria se busca la resolución del problema de manera rápida y sencilla.

Por otra parte, otro método es utilizando ecuaciones empíricas y algebraicas mucho más sencillas las cuales se resuelven mediante la implementación coeficientes o factores adimensionales que están próximos a describir el comportamiento del flujo, dichas ecuaciones son de muy fácil resolución ya que no requieren de amplios conocimientos matemáticos y físicos para llevar a cabo sus operaciones, pero en la práctica esto no resulta conveniente puesto a que los resultados obtenidos son muy idealizados.

En segundo lugar se recurre a los Bancos de Pruebas para realizar mediciones reales del flujo a través de las válvulas, para ello se necesitan materiales como Bidas, Manómetros, bombas, medidores, válvulas, etc., los resultados arrojados por este medio evidentemente son más exactos ya que se realizan mediciones reales sobre la válvula que se desea estudiar, pero se puede dar el caso de que los resultados arrojados por el sistema no sean los esperados ya que pueden existir perturbaciones en la medición por mala calibración de los equipos. Pero muchos fabricantes no optan por este método ya que requiere de una inversión elevada de tiempo y dinero los cuales muchas veces no están disponibles, por ello en los últimos años se han implementado otras herramientas para la resolución de estos problemas, siendo las más factibles las técnicas CFD.

1.2. Formulación del Problema.

¿Cómo se podría describir las variables que conforman el campo de flujo a través de válvulas hidráulicas de corte y analizar el fenómeno de cavitación en la misma como una inestabilidad hidrodinámica?

1.3.Objetivos de la Investigación.

1.3.1.Objetivo General.

Estudiar el fenómeno de cavitación en válvulas hidráulicas de corte utilizando la técnica de aproximación numérica CFD.

1.3.2.Objetivos Específicos.

Investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de válvulas hidráulicas de corte.

Seleccionar válvulas reales e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta CAD.

Simular el campo de flujo a través de las válvulas seleccionadas mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Obtener los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis.

1.4.Justificación

El desarrollo de la presente investigación tiene como objetivo principal estudiar el fenómeno de cavitación en válvulas hidráulicas de corte utilizando técnicas de aproximación numérica o dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), con el fin de observar los efectos y problemas originados por este fenómeno dentro del cuerpo de las válvulas, los cuales originan la disminución del rendimiento de la red. Utilizando esta simulación por computadora se podrá observar el comportamiento del fluido al pasar por el interior de los diferentes tipos de válvulas, siendo en el presente proyecto la válvula de Bola, de Compuerta y de Asiento Cónico.

1.5.Alcance

Al realizar el presente trabajo siguiendo y respetando los parámetros mencionados anteriormente ejecutará una simulación mediante técnicas CFD del comportamiento del fluido en el interior del cuerpo de las válvulas para analizar las variables o parámetros que intervienen en la formación de cavitación. La simulación se realizará en válvulas de Bola, de Compuerta y de Asiento Cónico puesto a que son las más usadas en la industria (Crane. 2011). Los resultados de dicha simulación serán registrados en gráficos y tablas para su posterior análisis.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico constituye un aspecto de mucha importancia dentro de la investigación, y según Behar, D. (2008)

El marco teórico nos amplía la descripción del problema. Integra la teoría con la investigación y sus relaciones mutuas. En la teoría del problema, por lo tanto, conviene relacionar el marco teórico con el problema y no con la problemática de donde éste surge. No puede haber un marco teórico que no tenga relación con el problema. (p. 33).

En este punto se presentan las directrices teóricas que guían la investigación describiendo las diferentes teorías que abordan el tema y principales evidencias teórico-empíricas existentes en la literatura nacional e internacional de acuerdo a trabajos ejecutados por investigadores dedicados al área del caso estudio.

2.1. Antecedentes.

Según Arias, F. (2006) “Los antecedentes reflejan los avances y el estado actual del conocimiento en un área determinada y sirven de modelo o ejemplo para futuras investigaciones” (p. 106). Esta sección se refiere a estudios previos relacionados con el problema planteado, es decir, investigaciones realizadas anteriormente que guarden relación con el proyecto en desarrollo. Los antecedentes sirven de asesoría al investigador para fundamentar su investigación y relacionarla con investigaciones que guarden similitud con el tema elegido.

Inicialmente, se encontró una investigación hecha por Sánchez, J. (2018), titulada **Análisis Dinámico Computacional del campo de flujo alrededor de una Válvula tipo Mariposa**, dicho trabajo se presentó para optar por el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad José Antonio Páez – Venezuela. Cuyo propósito fue realizar el análisis del campo de flujo alrededor de una válvula tipo

tipo mariposa del catálogo de la empresa Ozbekoglu de diámetro nominal de 6”, para definir su comportamiento mediante el uso de un software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Una vez culminada la investigación el autor concluye que, en ausencia del fenómeno de la cavitación, el flujo que pasa a través de la válvula es proporcional a la caída de la presión a través de la misma. Y por ende el inicio de la cavitación ocurre cuando se pierde la proporcionalidad entre el flujo que pasa a través de la válvula y la caída de presión a través de la misma.

Además, afirma que los parámetros que definen la cavitación en una válvula mariposa, son las presiones en la entrada de la válvula P1 (antes del obturador), P2 (después del obturador), temperatura del fluido y la caracterización del flujo. Adicional a esto, existen parámetros que ayudan en el estudio y predicción de la cavitación en válvulas mariposas, como lo son los coeficientes de descarga, flujo y el índice de cavitación. Siendo esta investigación de gran utilidad en cuanto a la metodología para el desarrollo de estos tipos de investigación.

Por otra parte, se tomó la investigación de Liu, B., Zhao, J. y Qian, J. (2017), titulada **“Análisis Numérico de la Erosión por Cavitación y la Erosión por Partículas en Válvula de Mariposa”**, trabajo realizado en el Instituto de Investigación de Tecnología de Energía Nuclear de China para optar por el grado de Magíster en ciencias con mención en Energía Nuclear, el cual se basó en el estudio del efecto de la Erosión por Cavitación y por Partículas sobre la superficie interna del cuerpo de una Válvula de Mariposa, ubicada en el sistema de filtración de agua en circulación (CWF) para el sistema de refrigeración de una central nuclear de reactor de agua a presión (PWR). Se tomaron en consideración factores como Presión a la entrada de la válvula y el ángulo de apertura de la misma para así evaluar la erosión producida por partículas dentro del fluido y la erosión producto de la cavitación.

En este estudio, se construyó un modelo de CFD de acoplamiento de Válvula de Mariposa multifase, cavitación y modelo de fase discreta para simular la erosión por cavitación y la erosión por partículas. Las simulaciones se realizan estableciendo

diferentes valores de presión de entrada en cada ángulo de apertura de la válvula, mientras que otros parámetros se mantienen igual que en el caso estándar. Los autores concluyeron que la erosión de la Válvula de Mariposa se produce principalmente en la parte delantera y trasera del disco de la válvula. La erosión en la parte delantera del disco es causada por la erosión de las partículas y la erosión en la parte posterior es por la erosión debido a la cavitación. La disminución del ángulo de apertura de la válvula o el aumento de la presión de entrada conduce a la aparición de la cavitación.

Por lo tanto, la erosión de la válvula de mariposa se puede prevenir con un mayor ángulo de apertura o una menor presión de entrada, otras soluciones planteadas por los autores se basan en cambiar el material de la mariposa por uno más resistente, o modificar el diseño de la mariposa para debilitar el efecto de la cavitación. Es de gran utilidad esta investigación ya que genera indicios en cuanto a las variables que intervienen en la Cavitación.

Seguidamente, Villarroel, L. (2015). Presentó su proyecto de grado titulado **“Simulación Numérica de un Flujo de Agua a través de una Válvula tipo Mariposa de Doble Excentricidad”**. El cual se presentó para optar por el grado de Magíster en Ciencias con mención en Energía en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), escuela de posgrado. Cuyo propósito fue mejorar el diseño de una válvula mariposa de doble excentricidad de diámetro nominal 610mm mediante simulación numérica por medio del software ANSYS Workbench 14.5 y el paquete CFX, realizando simulaciones sobre el diseño original de la válvula para así obtener las características hidráulicas más importantes de la misma, y posterior al análisis de los resultados, modificar geometría interna de la válvula para obtener un diseño alternativo el cual se simulará para verificar las mejoras alcanzadas en comparación con el diseño original.

Al finalizar la investigación, se realizó una modificación del diseño original de la válvula para obtener un diseño alternativo el cual resultó ser un 2% más ligero. Además, otro aspecto de relevancia fue que se consiguió una reducción del 38.3% del coeficiente de pérdidas y se aumentó un 40.4% la resistencia a la cavitación del

diseño original. Esto con un flujo de agua de alrededor de $1\text{m}^3/\text{s}$ a 10°C . El aporte más significativo al proyecto en desarrollo radica en que permite visualizar un tipo de metodología para realizar el mejor diseño posible de la válvula, a fin de aumentar el rendimiento de la misma.

Asimismo, se tomó la investigación por parte de Amirante, R., Distaso, E. y Tamburrano, P. (2014). Titulada **“Análisis Experimental y Numérico de Cavitación en Válvulas Direccionales Proporcionales Hidráulicas”**, el cual se realizó en el Departamento de Mecánica, Matemáticas y Gestión de la Universidad Politécnica de Bari – Italia para optar por el grado de Magister en ciencias con mención en Mecánica de Fluidos, cuyo objetivo principal fue evaluar los efectos de la Cavitación sobre el desempeño del tipo de válvula ya mencionado. El estudio se realizó para estimar cómo la cavitación cambia las curvas de rendimiento de la válvula, evaluando la influencia de este fenómeno en el caudal y el coeficiente de flujo en función de la posición del carrete. Además, se realizó un modelado tridimensional del campo de flujo para evaluar la posibilidad de aparición de cavitación para varias posiciones del carrete.

El análisis numérico para predecir la Cavitación se realizó para 10 posiciones del carrete por medio del Código Fluent 14, la confiabilidad del mismo se evaluó al comparar con los resultados experimentales, dando como resultado una gran concordancia entre los dos medios. Los resultados experimentales permitieron evaluar como empeoró la tasa y coeficiente de flujo debido a la cavitación, pero con las simulaciones CFD se pudo determinar la intensidad del fenómeno y su distribución dentro del cuerpo de la válvula. Siendo esta investigación de gran ayuda para el proyecto en desarrollo puesto a que al igual que los trabajos previos mostrados en este tópico, da orientación y evidencia de las variables que conllevan a la aparición de cavitación en las válvulas, siendo la de mayor relevancia la diferencia de presión entre la entrada y salida.

Por último, se encontró una investigación hecha por Valdés, J., Rodríguez, J., Monge, R., Peña, J. y Pütz, T. (2013), titulada **“Simulación Numérica y Validación**

Experimental del Flujo de Cavitación a través de una Válvula de Retención de Bola”, trabajo realizado en paralelo en Instituto Tecnológico de Aragón, María de Luna 8 – España en conjunto con la compañía TRW Automotive, Carl Spaeter Strasse – Alemania, la cual tuvo como objetivo ejecutar y validar simulaciones CFD numéricas del flujo de líquido a través de una válvula de retención de bola con y sin cavitación. El objetivo final fue validar la precisión del modelo de cavitación utilizado en simulaciones CFD para reproducir el flujo incompresible y turbulento a través de una válvula de retención de bola utilizada en la unidad de control hidráulico de un sistema ABS automotriz. Además, se realizaron pruebas experimentales para obtener el flujo másico en diferentes condiciones de operación, induciendo o evitando la aparición de cavitación ajustando convenientemente el nivel de presión en el puerto de salida. Las mediciones se comparan con los resultados de simulaciones numéricas CFD del flujo del fluido, con y sin la inclusión de un modelo de cavitación. Se analiza el coeficiente de flujo característico de la válvula y las fuerzas hidráulicas sobre la bola.

Al finalizar los experimentos y simulaciones llevadas a cabo por los autores, estos lograron inducir el fenómeno de Cavitación ajustando la presión de salida a nivel atmosférico y eliminarlo al elevar la presión a un valor suficientemente alto para evitar la aparición de la fase gaseosa. Se dieron cuenta que la correlación entre las mediciones y predicciones de CFD es excelente en ambos casos, validando así la precisión de las simulaciones y el modelo de cavitación para la predicción del flujo de la válvula.

Además, lograron que la función de coeficiente de flujo fuese extraída como una función del número de Reynolds y el número de cavitación, para así caracterizar la válvula con la mayor precisión posible en los bloques de simulación. Cabe destacar que este trabajo es de gran utilidad para el proyecto en desarrollo puesto a que pone en evidencia algunas de las variables que influyen en la aparición de Cavitación en las válvulas.

2.2.Bases Teóricas.

Todas aquellas bases teóricas que sustentan la investigación de acuerdo a Arias, F. (1999):

Comprenden un conjunto de conceptos y proposiciones que constituyen un punto de vista o enfoque determinado, dirigido a explicar el fenómeno o problema planteado. Esta sección puede dividirse en función de los tópicos que integran la temática tratada o de las variables que serán analizadas. (p. 14).

Este tópico es el basamento teórico sobre el cual se sustenta la investigación en curso, todas las teorías e investigaciones son consultadas de trabajos de diversos autores ya sean trabajos de grado, tesis de doctorado, publicaciones en revistas científicas, etc.

2.2.1. Régimen de Flujo: Laminar y Turbulento.

Al momento de iniciar un estudio de flujo a través de tuberías y accesorios una de las primeras cosas que se hace es tomar en consideración la división entre flujos laminares y turbulentos. Al realizar un estudio detallado sobre el flujo en una tubería, se observa que a bajas velocidades las líneas de corriente son paralelas, pero al aumentar la velocidad sobre un valor crítico el flujo se vuelve caótico (Ver Figura 1).

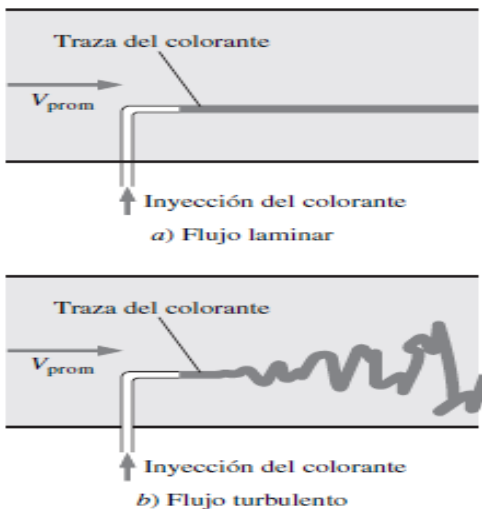


Figura 1. Comportamiento de un fluido, donde se observa los flujos laminar y turbulento.

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

En relación a lo anteriormente planteado, Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Se dice que el régimen de flujo en el primer caso es laminar, y se caracteriza por líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado; mientras que en el segundo caso es turbulento, y se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento también desordenado. La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre repentinamente; más bien, sucede sobre cierta región en la que el flujo fluctúa entre flujos laminar y turbulento antes de volverse totalmente turbulento. La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos. El flujo laminar se encuentra cuando los fluidos muy viscosos, como los aceites, fluyen en pequeñas tuberías o pasajes estrechos. (p. 323).

Con base en esto se puede decir que un fluido que circula a lo largo de una tubería no siempre se comporta de la misma forma ya que sobre él influye la velocidad a la cual se desplaza, la geometría del conducto, el tipo de fluido, etc., un flujo está en régimen laminar cuando las partículas se desplazan ordenadamente y por capas lo cual se consigue a bajas velocidades de flujo, conforme la velocidad aumenta, el comportamiento del flujo va cambiando y se vuelve un poco inestable puesto a que las moléculas empiezan a desordenarse, siendo esta la zona de transición laminar-turbulento, al aumentar aún más la velocidad se producen vórtices dentro del fluido y con ello se consigue un flujo en régimen turbulento en el cual las moléculas fluyen desordenadamente de manera fluctuante.

Asimismo, la transición entre regímenes de flujo se determina a partir de un número adimensional conocido como Re , el cual fue planteado en el año de 1880 por Osborne Reynolds quien descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de

. Esta razón se llama Número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería circular como:

$$Re = \frac{\text{FuerzasInerciales}}{\text{FuerzasViscosas}} = \frac{\bar{v}D}{\nu} = \frac{\rho\bar{v}D}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

\bar{v} = Velocidad promedio del flujo [m/s].

D = Diámetro de la tubería [m].

$$^2/s], = /$$

= Densidad del fluido [kg/m³].

Para estudios muy precisos, es deseable tener valores de números de Reynolds con mínimo error para flujos laminar, transicional y turbulento, pero en la práctica este no es el caso. La transición de flujo laminar a turbulento depende también del grado de perturbación del flujo por la rugosidad de la superficie, las vibraciones de la tubería y las fluctuaciones en el flujo. En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para $Re = 2300$, turbulento para $Re = 4000$, y transicional entre ellos. (ver tabla 1).

Tabla 1. Régimen de Flujo de acuerdo al Número de Reynolds.

Re	Flujo Laminar
	Flujo Transicional
	Flujo Turbulento

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

* Los rangos de valores de número de Reynolds pueden variar dependiendo del autor del documento consultado.

2.2.2. Pérdida de Presión en Válvulas y Accesorios.

Cuando un fluido se desplaza por una tubería recta y de diámetro constante, el flujo tiene una configuración de manera tal que la distribución de velocidad sobre la sección de la tubería es casi uniforme a lo largo del trayecto. Pero cualquier obstáculo en la sección por donde circula el fluido cambia total o parcialmente la dirección de las líneas de corriente, alterando su comportamiento y ocasionando turbulencia lo que causa una pérdida de energía o también conocido como .

Para el caso de una tubería la pérdida de carga se encuentra fundamentada en una relación propuesta por Henry Darcy (1806 – 1858) y Julius Weisbach (1806 – 1871), denominada, Ecuación de Darcy – Weisbach y se expresa de la siguiente manera:

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

Donde:

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción [m].

L = Longitud de la corriente de flujo [m].

D = Diámetro de la tubería [m].

\bar{v} = Velocidad promedio del flujo [m/s].

f = Factor de fricción de Darcy.

g = Aceleración Gravitacional, 9,81 m/s².

Según Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006) “La pérdida de carga h_L representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería” (p. 330). Esto representa la energía adicional que debe suministrar la bomba para mantener un flujo continuo a lo largo de la tubería para así vencer la resistencia que genera la rugosidad al movimiento del fluido. Expresando la ecuación (3) en términos de la pérdida de presión queda de la siguiente manera:

$$P_L = f \frac{L \rho \bar{v}^2}{D} \quad (3)$$

Donde:

P_L = Pérdida de presión [Pa].

ρ = Densidad del fluido [kg/m³].

La relación entre h_L y P_L es de la siguiente manera:

$$h_L = \frac{P_L}{\rho g} \quad (4)$$

Por otra parte, al referirse a las pérdidas de carga ocasionadas por accesorios en sistemas de tuberías, ya sean Válvulas, Codos, Tees, Reducciones, etc., estas se conocen como $h_{L,a}$, siendo llamadas de esta forma ya que en la mayoría de los casos las pérdidas en estos componentes son despreciables en comparación con la pérdida de carga en una tubería larga. Estas pérdidas se expresan

en función del K_L o también llamado coeficiente de pérdida y se expresa de la siguiente manera:

$$h_L = K_L \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (5)$$

Expresándolo en términos de la caída de presión:

$$P_L = K_L \frac{\rho \bar{v}^2}{2} \quad (6)$$

Asimismo, este coeficiente K_L depende de la geometría del accesorio y se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds

además se encuentra tabulado para una amplia gama de accesorios en sistemas de tuberías, así como también para acoples en los orificios de descarga para tanques de almacenamiento de fluido. Las pérdidas menores en función del coeficiente de pérdida también se expresan en términos de la longitud equivalente L_{equiv} ,

que se define como:

$$h_L = K_L \frac{\bar{v}^2}{2g} = f \frac{L_{equiv}}{D} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (7)$$

$$K_L = \frac{L_{equiv}}{D} f$$

Donde:

L_{equiv}/D = Relación de longitud equivalente.

De acuerdo a Mott, R. (2006). “El valor de L_{equiv} se denomina Longitud Equivalente, y es la longitud de una tubería recta del mismo diámetro nominal que el de la válvula, la cual tendría la misma resistencia que ésta” (p. 296). Esto es simplemente una idealización en la cual se sustituye la válvula por una tubería con una longitud tal que produzca la misma pérdida de carga equivalente a la que produce dicha válvula.

2.2.3. Flujo turbulento.

Continuando con aportes de Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006), el flujo en régimen turbulento se puede definir como:

Un mecanismo complejo dominado por fluctuaciones, y pese a las innumerables investigaciones realizadas en esta área, la teoría del flujo turbulento aún no se conoce totalmente (...) El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos, a través del flujo. Dichas fluctuaciones proporcionan un mecanismo adicional para transferir movimiento y energía. En flujo laminar, las partículas fluyen en orden a lo largo de trayectorias, y la cantidad de movimiento y la energía se transfieren a través de líneas de corriente mediante difusión molecular. En el flujo turbulento, los remolinos giratorios transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo con mayor rapidez que la difusión molecular, y aumentan enormemente la masa, la cantidad de movimiento y la transferencia de calor. Como resultado, el flujo turbulento está relacionado con valores mucho más altos de coeficientes de fricción, transferencia de calor y transferencia de masa. (p. 335).

De acuerdo a investigaciones hechas por muchos científicos la comprensión del comportamiento del flujo turbulento aún no está completamente clara, por otra parte, según Franzini, J. y Finnemore, J. (1999):

En el flujo turbulento la velocidad en un punto del campo fluido fluctúa tanto en magnitud como en dirección, (...) estas fluctuaciones se originan por una multitud de pequeños remolinos creados por el esfuerzo cortante viscoso entre partículas adyacentes. Estos remolinos crecen en tamaño y luego desaparecen cuando sus partículas son absorbidas en remolinos adyacentes. Por tanto, hay una mezcla continua de partículas con la transferencia correspondiente de cantidad de movimiento. La viscosidad disipa energía, generando pequeñas cantidades de calor (p. 168).

Es evidente que un fluido que fluye a través de una sección de tubería o cualquier accesorio en régimen de flujo turbulento presenta un comportamiento bastante particular y es un poco difícil de estudiar, ya que el análisis para estos casos abarca una gran cantidad de variables las cuales muchas de ellas se han trabajado mediante experimentos de laboratorio que pueden diferir respecto a casos que se presentan en la práctica, a pesar de ello en la mayoría de las redes de distribución se

trabaja con flujo turbulento ya que la transferencia de energía de una molécula a otra se produce de una manera más rápida que en el flujo laminar.

2.2.3.1. Perfil de Velocidad.

Conforme se ha avanzado en el estudio del comportamiento de los fluidos en diferentes condiciones, han surgido expresiones matemáticas que ayudan a determinar ciertos parámetros que son necesarios al momento de la resolución de un problema, algunas de ellas se emplean para definir el perfil de velocidad o la distribución de velocidades de un fluido a través de un conducto. En la Figura 2 se muestra la distribución de velocidades del flujo laminar y turbulento.

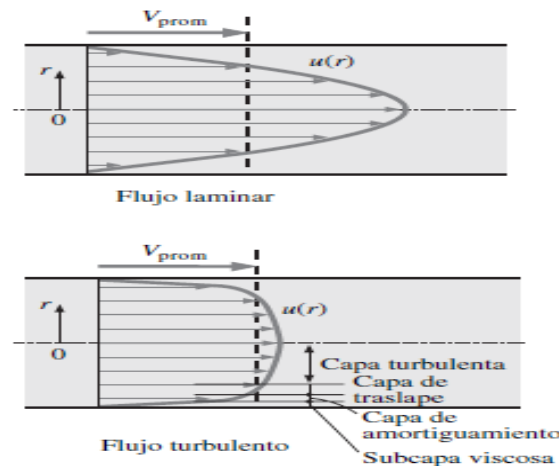


Figura 2. Perfil de velocidad, desarrollado en flujo laminar y en flujo turbulento.
Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Evidentemente, la distribución o perfil de velocidad del flujo laminar es muy diferente al flujo turbulento y de acuerdo a Mott, R. (2006). “En el perfil de velocidad para el flujo turbulento (...) la velocidad del fluido cerca de la pared del tubo cambia con rapidez desde cero en la pared a una distribución de velocidad casi uniforme en toda la sección transversal” (p. 258).

Por otra parte, Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006) afirman que:

A diferencia del flujo laminar, las expresiones para el perfil de velocidad en un flujo turbulento se basan en el análisis y en las mediciones, por lo tanto, son de naturaleza casi empírica, y tienen constantes que se determinan a partir de datos experimentales (...) La delgada capa junto a

la pared donde los efectos viscosos son dominantes es la (o laminar o lineal o de pared). El perfil de velocidad en esta capa es casi lineal, y el flujo es de líneas de corriente aproximadamente paralelas como en el flujo laminar. Junto a la subcapa viscosa está la , en la que los efectos turbulentos se vuelven significativos, pero el flujo todavía es dominado por los efectos viscosos. Sobre la capa de amortiguamiento está la (o transición), también llamada Subcapa Inercial, en la que los efectos turbulentos son mucho más significativos, pero todavía sin dominar. Sobre esta capa se encuentra la (o turbulenta) en la parte restante del flujo en la que los efectos turbulentos dominan sobre los efectos de difusión molecular (viscosos) (p. 338).

Conforme se aleja el fluido de la pared limitante este se enfrenta a la variación de los efectos viscosos y turbulentos, los cuales son los causantes de una distribución de velocidades tal y como se mostró en la Figura 2. Aclarando que los efectos viscosos sólo afectan al flujo en las regiones más cercanas a la superficie limitante y los efectos turbulentos se ocupan de la zona central del flujo.

2.2.4. Flujo Másico.

La tasa de flujo de un fluido es según Mott, R. (2006) “La cantidad de fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo” (p.154). Esto puede expresarse en función del Flujo Másico, que es la cantidad de masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo, se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{m} = \rho \bar{\mathbf{V}} \mathbf{A} \quad (8)$$

Donde:

m : Flujo másico (kg/s)

ρ : Densidad del fluido.

$\bar{\mathbf{V}}$: Velocidad media del fluido.

A : Área transversal del flujo.

2.2.5. Válvulas de Corte.

Las válvulas, de acuerdo a Lezama, J. (2009) se definen como “un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de

líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos” (p. 17). Es decir, son elementos que impiden o dejan paso libre a fluidos que circulan en sistema de tuberías, su analogía esta con los interruptores eléctricos que abren o cierran el paso al flujo de corriente eléctrica.

Las válvulas de corte son un tipo de válvulas muy usadas en las industrias y tienen un amplio rango de aplicaciones, están diseñadas para el bloqueo total o paso libre del flujo de una manera rápida, además permiten regular el caudal cuando se mantienen en posiciones intermedias. Un modelo de cálculo analítico para determinar las pérdidas de carga en válvulas es descrito por Mott, R. (2006. p. 297), dicho modelo se lleva a cabo de la siguiente manera:

Determinar la resistencia de válvulas y acoplamiento, expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D . (Ver Figura 3).

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de ángulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
—¼ abierta	35
—½ abierta	160
—¾ abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a 90°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Figura 3 Resistencia de válvulas y acoplamiento.

Fuente: Mott, R. (2006).

Determinar la rugosidad relativa ϵ/D y el factor de fricción

Calcular $K = (L_e/D) *$

Calcular $h_L = K (V^2/2g)$

A continuación, se describen las válvulas tomadas en cuenta en la investigación:

2.2.5.1. Válvulas de Bola.

Según Lezama, J. (2009):

Las válvulas de bola son de $\frac{1}{4}$ de vueltas, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola 90° y cierra el conducto. (p.23).

Las aplicaciones de este tipo de válvulas están en servicios generales, altas temperaturas, pastas semilíquidas, etc. En el cuadro 1 se muestran las ventajas y desventajas que tiene este tipo de válvula.

Cuadro 1. Ventajas y Desventajas de la válvula de Bola

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Características poco adecuadas para el estrangulamiento
Alta capacidad	Alto par de torsión para accionarla
Corte bidireccional	Susceptible al desgaste del sello
Patrón de flujo en línea recta	Propensa a cavitación
Pocas fugas	
Se limpia por si misma	
Poco mantenimiento	
No necesita lubricación	
Compacta	
Cierre hermético con bajo par de torsión	

Fuente: Escalante, S. (2014).

A continuación, se muestran imágenes de válvulas de bola (Ver figura 4 y 5).



Figura 4. Válvula de Bola.

Fuente: Lezama, J. (2009).

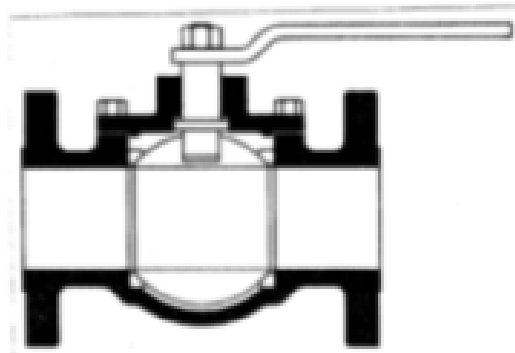


Figura 5. Geometría interna de una válvula de Bola.

Fuente: Pachano, L. y Pérez, F. (s.f.).

2.2.5.2. Válvulas de Globo

Según Lezama, J. (2009):

Una válvula de globo es de vueltas múltiples, en el cual el cierre se logra por medio de un disco o tapón que sierra o corta el paso del fluido en un asiento que suele estar paralelo con la circulación en la tubería. Estas válvulas son recomendadas para estrangulación o regulación de circulación, para accionamiento frecuente, para corte positivo de gases o aire y cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación. (p.22).

Las aplicaciones de este tipo de válvula están en servicio general, líquidos, vapores, gases corrosivos, etc. Dentro de este grupo se encuentran las válvulas de asiento cónico. En el cuadro 2 se muestran las ventajas y desventajas que tiene este tipo de válvula.

Cuadro 2. Ventajas y Desventajas de la válvula de Globo

Ventajas	Desventajas
Estrangulación deficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento.	Gran caída de presión
Carrera corta del disco y pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y bonete.	Costo relativamente elevado.
Control preciso de la circulación	

Fuente: Escalante, S. (2014).

A continuación, se muestran imágenes de válvulas de asiento cónico, (Ver figura 6 y 7), y además se muestra el coeficiente K en función de θ para el cálculo de pérdida de carga (Ver figura 8).

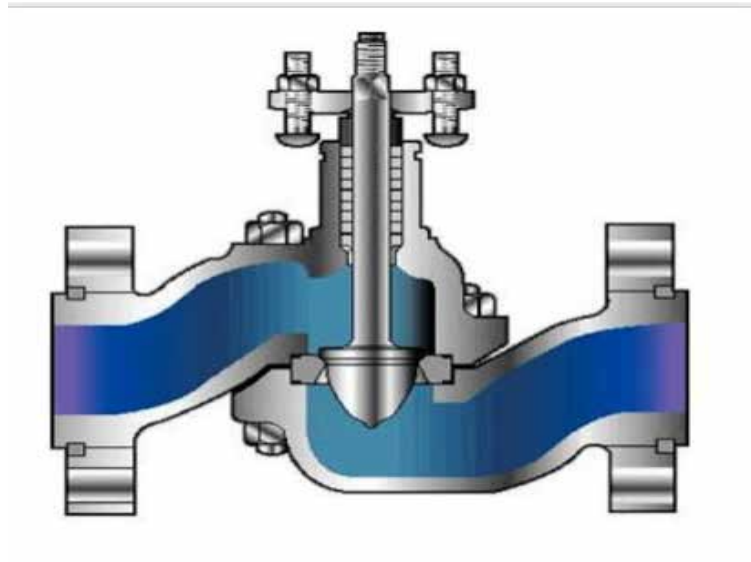


Figura 6. Válvula de asiento cónico.

Fuente: Escalante, S. (2014).

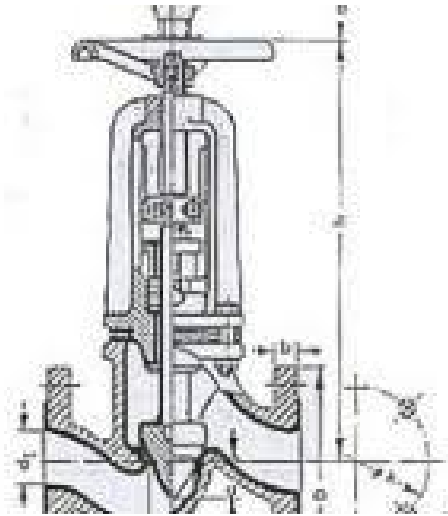


Figura 7. Geometría interna de una válvula de asiento cónico.

Fuente:

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSZY4jh49mfPlsK2tVOvLi4c5uUb4R9w4DKFiM0U-GdpzEjVgz-wAT8Ts>

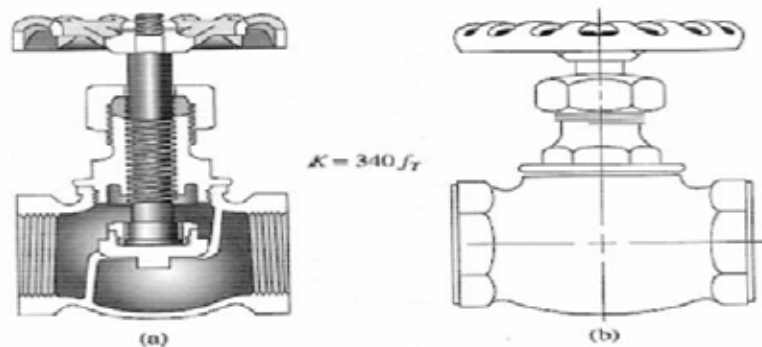


Figura 8. Coeficiente K para válvula de globo.

Fuente: Mott, R. (2006).

2.2.5.3. Válvulas de Compuerta.

Según Lezama, J. (2009):

La válvula de compuerta es de vueltas múltiples, en la cual se cierra el orificio vertical de cara plana que se desliza en ángulos rectos sobre el asiento. Estas válvulas son recomendadas para, servicios con abertura total o cierre total, sin estrangulación, para uso poco frecuente, para resistencia mínima a la circulación y para mínimas cantidades de fluido o líquidos atrapados en la tubería. Son aplicables para servicios generales, aceites y petróleo, gas, aire, pastas semilíquidas y líquidos espesos (p. 21)

Para dar uso a este tipo de válvula debe enfatizarse el punto de que la misma solo puede operar en abertura total o cierre total, esto por la razón de que existe un alto desgaste por erosión de la compuerta al mantener este tipo de válvula en una posición intermedia. A continuación, en el cuadro 3 se muestran las ventajas y desventajas de este tipo de válvula.

Cuadro 3. Ventajas y Desventajas de la válvula de compuerta.

Ventajas	Desventajas
Alta capacidad	Control deficiente del flujo
Cierre hermético	Fuerza de operación elevada
Bajo costo	Cavitación a baja caída de presión
Sencillez de diseño y operación	Debe estar completamente abierta o cerrada
Poca resistencia al flujo	La posición de estrangulamiento erosionara el asiento y el disco.

Fuente: Escalante, S. (2014).

A continuación, se muestran imágenes de válvulas de compuerta (Ver figura 9 y 10), y además se muestra el coeficiente K en función de Q para el cálculo de pérdida de carga (Ver figura 11).



Figura 9. Válvula de compuerta.

Fuente: Escalante, S. (2014).

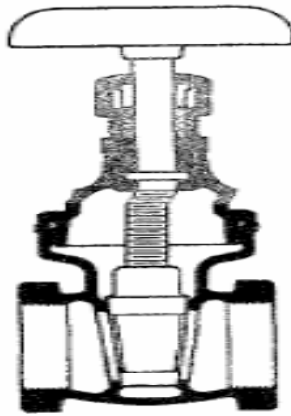


Figura 10. Geometría interna de la válvula de compuerta.

Fuente: Escalante, S. (2014).

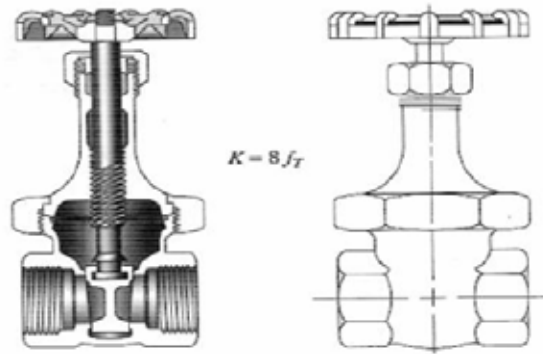


Figura 11. Coeficiente K para válvula de compuerta.

Fuente: Mott, R. (2006).

2.2.6. Cavitación.

La cavitación es un fenómeno que se presenta en muchas turbomáquinas, ya sean bombas o turbinas hidráulicas, específicamente para transporte de fluidos líquidos incompresibles. Pero además en las válvulas también se presenta este fenómeno, el cual presenta una problemática como ya se ha venido comentando previamente. De acuerdo a investigaciones de Balcazar, F. (2013):

La palabra cavitación proviene del latín que significa espacio hueco o cavidad. En los diccionarios técnicos, se define como: la rápida formación y colapso de cavidades en zonas de muy baja presión en un

flujo líquido. Algunos autores que han estudiado este fenómeno han definido que la cavitación consiste en la formación de vapor de agua a causa del descenso local de la presión por debajo de la presión de saturación del fluido a la temperatura del líquido, la subsecuente condensación brusca, produciendo golpes hidráulicos. (p. 2).

Básicamente, este fenómeno consiste en la formación de burbujas en el fluido, estas burbujas pueden ser aire, vapor del propio fluido u otro gas disuelto en el líquido condensado. Estas burbujas a medida que se aumenta la presión colapsan sobre sí mismas lo que produce daños al material por el cual circula el fluido. Una manera simple de definir la cavitación es según Balcazar, F. (2013. p. 2).

2.2.6.1. Factores que intervienen en la Cavitación.

En el proceso de formación de las burbujas de cavitación intervienen una gran cantidad de factores tales como las propiedades propias del fluido, las condiciones del ambiente donde se ubica el elemento que transporta el fluido, así como también la geometría interna del mismo. En su investigación Balcazar, F. (2013) define algunos factores relacionados con el fluido, algunos de estos son:

Temperatura.

Densidad.

Propiedades Físico-Mecánicas.

Composición química, entre otros.

En resumidas cuentas, al referirse a la válvula que transporta el fluido se podrían considerar los siguientes factores:

Caída de presión entre el punto aguas arriba y aguas abajo.

Rugosidad superficial.

Geometría interna.

Pérdida de carga, entre otros.

2.2.6.2.Etapas de la Cavitación.

En la Figura 12 se muestra el proceso de cavitación:



Figura 12.Etapas de la Cavitación

Fuente: Balcazar, F. (2013).

Por experiencia se conoce que un fluido que circula a través de una tubería o cualquier otro elemento presenta puntos de nucleación, conocido también como partículas o sólidos en suspensión, suciedad, etc. Y según Balcazar, F. (2013) “Esto da lugar a discontinuidades y a superficies cóncavas que inducen la nucleación o germinación de las burbujas” (p. 4).

Al observar la figura 12, es de notar que el proceso de cavitación tiene una serie de etapas muy distintivas unas de otras. Balcazar, F. (2013. p. 4) explica este proceso de la siguiente manera:

El crecimiento de la burbuja aparece asociado a los puntos de nucleación (discontinuidades). Puede ser lenta o rápida según el mecanismo predominante que genere la cavitación.

El colapso de una burbuja induce una onda de presión en el medio que la rodea. Localmente, los niveles de presión no son muy elevados pero sus efectos pueden ser catastróficos por actuar normalmente sobre superficies muy reducidas. Este hecho es acompañado por niveles altos de conversión de energía, resultando en un efecto de martilleo real en los alrededores de las superficies. Esto crea esfuerzos de fatiga en el material, deformaciones plásticas y remoción de partículas del cuerpo principal.

La súbita irrupción del líquido en la cavidad se crea con la desaparición de las burbujas de vapor, es causa de una destrucción mecánica, puesta algunas veces como acción perforadora, denominada como erosión.

En la figura 13 se muestra el proceso de aparición y posterior colapso de una burbuja de cavitación.

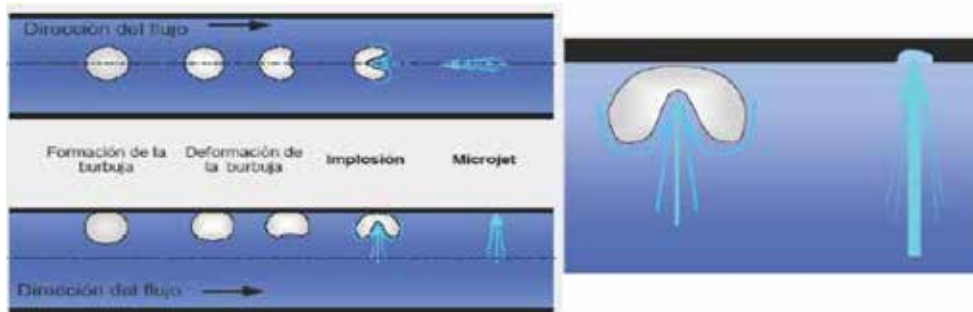


Figura 13.Colapso de la burbuja con la subsiguiente formación del Jet.

Fuente: Balcazar, F. (2013).

2.2.6.3. Tipos de Cavitación.

Según la forma de producirse la cavitación.

- i. **Cavitación de Vapor**, debida a la disminución local de presión en el seno de un líquido.
- ii. **Cavitación gaseosa**, ocasionada por la introducción desde el exterior, de energía en puntos del líquido (aumento de la temperatura, inducir vibración local de las partículas, etc.)

Según el grado de desarrollo.

- i. **Cavitación incipiente**, es una etapa inicial de la cavitación en la que empieza a ser visible la formación de las burbujas.
- ii. **Cavitación desarrollada**, se trata de una etapa en la que se tiene un número de burbujas lo suficientemente elevado como para producir una modificación del campo hidrodinámico.
- iii. **Supercavitación**, cuando se tiene una superficie sólida sumergida, la cavitación se extiende ocupando en su totalidad dicha superficie. Aparece, por

ejemplo, en las hélices de lanchas rápidas en las que las condiciones ante la cavitación son críticas. (Ver figura 14).

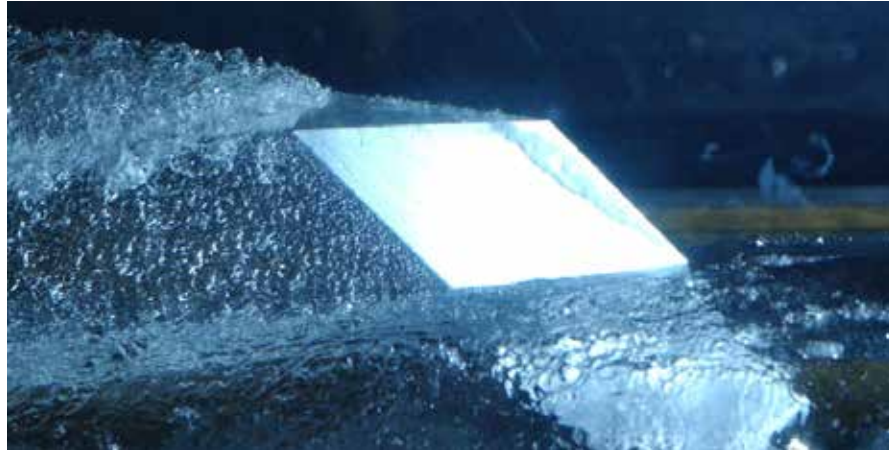


Figura 14.Supercavitación.

Fuente:

<https://www.ecestaticos.com/imagestatic/clipping/25e/cba/25ecba9912f6f11c954ae59e7db47acb/supercavitacion-la-tecnologia-que-permitira-cruzar-el-pacifico-en-100-minutos.jpg?mtime=1408963950>

iv. Cavitación separada, etapa final de la cavitación, cuando está próxima a desaparecer. Se produce normalmente en zonas de estela y su importancia es mucho menor que las anteriores.

Según su manifestación macroscópica.

- i. Cavitación de burbujas aisladas (Bubble Cavitation)**, cuando el número de burbujas es muy denso da lugar a la llamada cavitación de nube (cloud cavitation).
- ii. Cavitación de lámina (sheet cavitation)**
- iii. Cavitación de estría (Streak Cavitation)**, es un tipo de cavitación de burbujas, en la que la nucleación de las mismas se produce siguiendo una línea.

2.2.7. Metodología CFD.

Esta metodología para la solución a problemas de ingeniería que involucran fluidos, se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (por sus siglas en inglés), y según Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006):

Es el campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones del flujo de fluidos con computadora (o, en fechas recientes, con computadoras que trabajan en paralelo). Los ingenieros modernos aplican tanto análisis experimental como DFC, y los dos métodos se complementan entre sí. Por ejemplo, los ingenieros podrían obtener propiedades globales, como sustentación, fuerza de arrastre, caída de presión o potencia, experimentalmente; pero emplean la DFC para obtener detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de corte, velocidad y perfiles de presión y líneas de corriente. Además, los datos experimentales se emplean con frecuencia para validar soluciones de DFC al comparar las cantidades globales determinadas de manera computacional y experimental. (p. 818).

Evidentemente, es una metodología muy empleada actualmente ya a que permite acortar el ciclo de diseño mediante estudios paramétricos, reduciendo así la cantidad necesaria de análisis experimental. Además, el análisis CFD permite estudiar variables y propiedades que mediante la instalación de un banco de pruebas serían imposibles de analizar. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen mediante el estudio en paralelo de modelos CFD y experimentación real. En la figura 15 se observa el procedimiento estándar para la resolución de un problema de ingeniería mediante CFD.

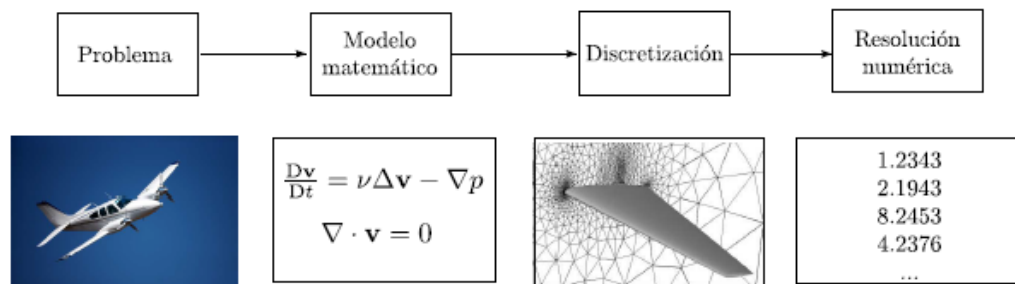


Figura 15. Pasos para resolver numéricamente un problema con CFD

Fuente: Durán, A. (2014).

2.2.7.1. Ecuaciones de Movimiento.

Para el análisis CFD se emplean dos ecuaciones fundamentales, la ecuación de continuidad (ecuación 9) y la ecuación de Navier-Stokes (ecuación 10):

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{V} = 0 \quad (9)$$

$$(\bar{\nabla} \cdot \bar{V}) \cdot \bar{V} = \frac{1}{\rho} \bar{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \bar{V} \quad (10)$$

Donde:

\bar{V} : Velocidad del Fluido [m/s]

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

P : Presión modificada [Pa]

Cabe señalar que las ecuaciones (9) y (10) solo se aplican para flujos incompresibles en los cuales se supone también que ρ son constantes. En caso de que el análisis involucre transformación o transferencia de energía debe resolverse otra ecuación de transporte, la cual es la ecuación de energía. Por otra parte, si las diferencias de temperatura en la trayectoria del fluido causan cambios importantes en la densidad del mismo, se debe usar la ecuación de estado, es decir, las expresiones utilizadas para la aplicación de métodos CFD cambian conforme lo requiere el estudio a realizar.

2.2.7.2. Geometría CAD.

En un sentido amplio, se puede entender el Diseño Asistido por Computador (CAD) como la "aplicación de la informática al proceso de diseño". Puntualizando la definición, se entiende por Sistema CAD, un sistema informático que automatiza el proceso de diseño de algún tipo de ente. Actualmente existe una amplia gama de software para diseño CAD, siendo los más utilizados, SolidWorks y Autodesk Inventor. (Ver figura 16a y 16b).



Figura 16. (a) SolidWorks, (b) Inventor.

Fuente: (a) <https://www.logolynx.com/images/logolynx/96/96784db947ed1c6f0fb4139bdcfc86e0.jpeg>

(b) <https://www.logolynx.com/images/logolynx/68/68d6aebf0675f0e1c25f6aa4b6ad9afc.png>

2.2.7.3. Mallado.

De acuerdo a Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006) “El primer paso (y posiblemente el paso más importante) en una solución de DFC es generar una malla que define las celdas en las que se calculan las variables de flujo (Velocidad, Presión, entre otras) en todo el dominio computacional” (p. 821). Esto se obtiene con la geometría del dominio en un software CAD, esta debe ser una versión simplificada del original y los detalles como redondeos, agujeros y otros deben evaluarse si formarán parte de la simulación ya que esto puede incrementar la complejidad de la misma. El mallado se clasifica como:

i. Malla estructurada

Consta de celdas planas de cuatro lados (2-D) o celdas volumétricas de seis caras (3-D). Aunque la forma rectangular de las celdas podría estar distorsionada, cada celda se numera de acuerdo con los índices (i, j, k) que no necesariamente corresponden a las coordenadas X, Y Z. En la figura 17 se ilustra una malla estructurada (2-D) y una malla estructurada (3 – D) se muestra en la figura 18.

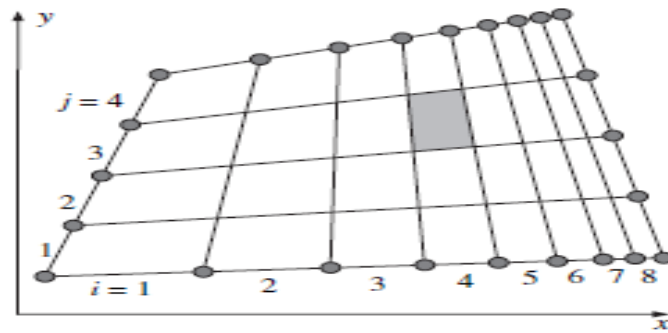


Figura 17. Ejemplo de malla estructurada bidimensional. La malla tiene nueve nodos y ocho intervalos en los lados superior e inferior, y cinco nodos y cuatro intervalos en los lados izquierdo y derecho.

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Los intervalos corresponden a $i =$ de 1 al 8 y $j =$ de 1 al 4, luego, se genera una malla interna que conecta los nodos uno por uno en el dominio del problema de modo que los renglones ($j =$ constante) y columnas ($i =$ constante) se definan con claridad, aunque las celdas por sí mismas podrían estar distorsionadas (no necesariamente rectangulares). En una malla estructurada 2-D, cada celda se especifica de manera única mediante un par de índices (i, j). Debe recordarse que algunos paquetes de la CFD numeran nodos en vez de intervalos.

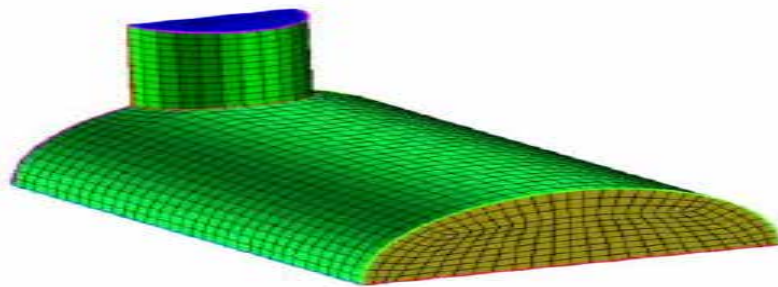


Figura 18. Malla Estructurada formada por hexaedros.

Fuente: Villarroel, L. (2015).

ii. Malla no Estructurada

Una malla no estructurada consta de celdas de varias formas, pero comúnmente se emplean triángulos o cuadriláteros (2-D) y tetraedros (Ver figura 20) o hexaedros (3-D). Se generan dos mallas no estructuradas para el mismo dominio que el de la

figura 17 estructurada, con la misma distribución de intervalo en los lados; estas mallas se muestran en la figura 19. A diferencia de la malla estructurada, en la no estructurada, no puede identificarse a las celdas de manera única mediante los índices i y j ; en cambio, las celdas se numeran internamente de alguna otra manera por el paquete CFD.

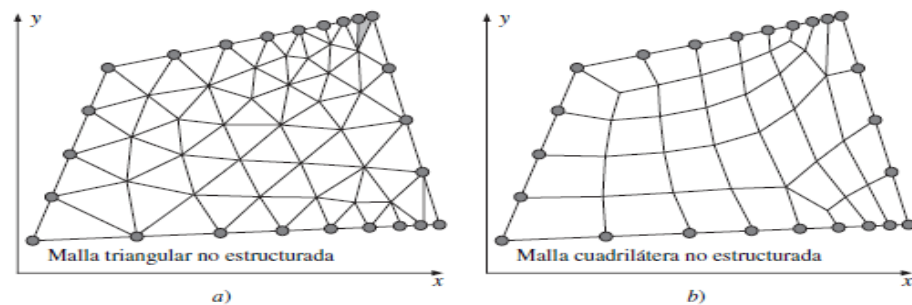


Figura 19. Ejemplo de mallas no estructuradas bidimensionales. La malla tiene nueve nodos y ocho intervalos en los lados superior e inferior, y cinco nodos y cuatro intervalos en los lados izquierdo y derecho.

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

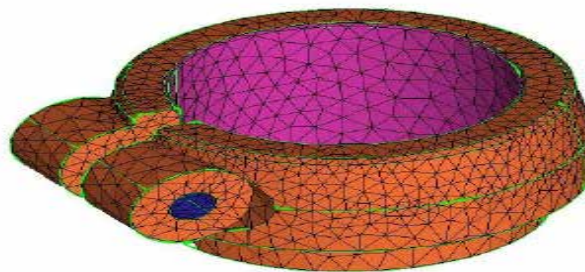


Figura 20. Malla no estructurada formada por tetraedros.

Fuente: Villarroel, L. (2015).

Para configuraciones geométricas complejas, por lo general es mucho más fácil para el usuario del paquete de generación de malla crear una no estructurada. Cabe señalar que en una malla estructurada se generan menos celdas que con una no estructurada, esto se demuestra al comparar las figuras 17 y 19. En las capas límite, donde las variables del flujo cambian con rapidez en dirección normal a la pared se requieren mallas de alta resolución, las mallas estructuradas permiten una resolución

mucho más fina que las no estructuradas para el mismo número de celdas. Esto puede verse cuando se comparan las mallas de las figuras 17 y 19 cerca del lado derecho, las celdas de la malla estructurada son más delgadas y están muy compactadas cerca del lado derecho, a diferencia de las celdas de las mallas no estructuradas. Sin embargo, es de aclarar que sin importar el tipo de malla que se elija, lo fundamental para los resultados de un análisis CFD es la calidad de la misma.

Asimismo, la generación de una malla estructurada es directa para configuraciones geométricas con lados rectos, todo lo que se necesita hacer es dividir el dominio computacional en bloques o zonas de cuatro lados (2-D) o seis lados (3-D). Dentro de cada bloque se genera una malla estructurada (ver figura 21(a)). Este tipo de análisis se llama .

Para configuraciones geométricas más complicadas con superficies curvas, se necesita determinar cómo puede dividirse el dominio computacional en bloques individuales que pudieran tener o no lados (2-D) rectos o caras (3-D) planos. Un ejemplo bidimensional con arcos circulares se muestra en la figura 21(b).

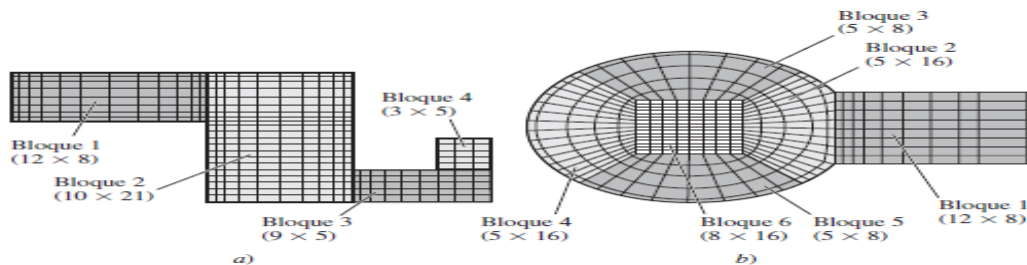


Figura 21. Ejemplos de mallas estructuradas generadas para el análisis de bloques múltiples de CFD.

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Algunos paquetes de la CFD aceptan sólo bloques elementales, los cuales son bloques cuyos lados o caras no pueden dividirse. Esto se observa utilizando la figura 21(a), la cual necesita siete bloques elementales (figura 22).

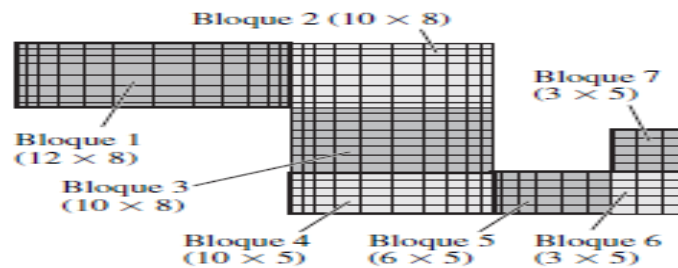


Figura 22 Malla de bloques múltiples de la figura 21(a) modificada para un paquete CFD que maneja sólo bloques elementales.
Fuente: Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

iii. Malla Híbrida

Para este caso, simplemente es la combinación de regiones o bloques de mallas estructuradas y no estructuradas (Ver figura 23). Una aplicación sería al juntar una malla estructurada cercana a una pared con un bloque de malla no estructurada fuera de la región de influencia de la capa límite. Con frecuencia se emplea una malla híbrida para permitir alta resolución cerca de una pared sin necesitar alta resolución lejos de la pared (ver figura 24).

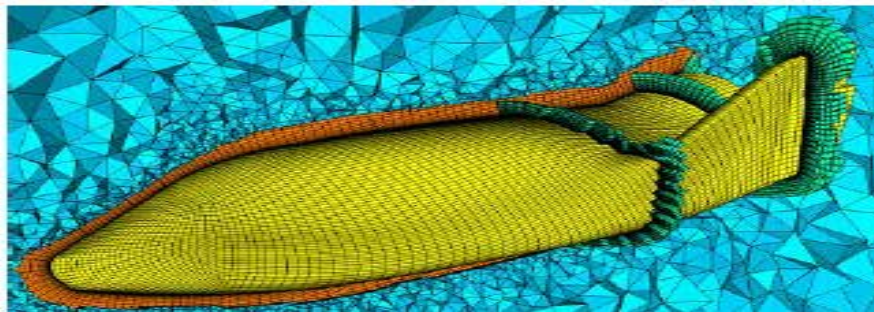


Figura 23. Malla híbrida de elementos no estructurados con elementos estructurados.
Fuente: Villarroel, L. (2015).



Figura 24. Malla híbrida bidimensional en cercanía a una superficie curva.
Fuente: Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

2.2.7.4. Validación de las características de la Geometría y Mallado

Verificación de la Geometría

Verificación de ejes “Sliver edge checking”

Realiza una búsqueda de los ejes más pequeños en la geometría, los cuales pueden producir una malla de baja calidad en regiones cercanas a estos; usando como criterio el valor de tolerancia de longitud mínima de un eje, $1.6E-1$ [mm].

Verificación de las caras “Sliver face checking”

Es un factor de verificación de geometría que relaciona el perímetro con el área para cada cara. Caras con un factor de “Sliver Face” pueden resultar en mallas con una pobre calidad superficial. El Sliver Factor es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$Sliver\ Factor = \frac{(Perimetro)^2}{4\pi Area} \quad (11)$$

El valor máximo permisible de “Sliver Factor” es 25.

Verificación de la distorsión “Parametrization Face checking”

Es un parámetro que mide la distorsión de las caras, la máxima distorsión aceptada normalmente es 10.

Verificación del Mallado

Ortogonalidad del Mallado “Mesh Orthogonality”

El concepto de malla ortogonal se refiere al ángulo entre caras de elementos adyacentes o el ángulo entre ejes de elementos adyacentes, estén cerca de su ángulo óptimo (por ejemplo, 90° para cuadrilátero y los 60° para elementos de caras triangulares).

Factor de expansión de la Malla “Mesh expansion factor”

Este factor se refiere a la mayor tasa de cambio de volumen entre volúmenes de control adyacentes y se calcula de manera aproximada relacionando el radio máximo con el radio mínimo de volúmenes de control adyacentes. El “Mesh expansion factor” recomendado para las aplicaciones es de 20.

Aspecto de radio de la malla “Mesh aspect ratio”

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

2.2.7.5. Discretización.

Para entender la Discretización, primero se deben definir los métodos numéricos, y según Saludes, A. (2015):

Los métodos numéricos tratan como sus incógnitas fundamentales los valores de la variable independiente de estudio, en un número finito de localizaciones (puntos de mallado) dentro del dominio de cálculo. El método incluye proveer un conjunto de ecuaciones que describa el comportamiento de cada conjunto de puntos dentro del mallado, y un algoritmo mediante el cual poder resolver estas ecuaciones. Centrando nuestra atención en los puntos del mallado, se ha de reemplazar la información continua contenida en las soluciones exactas de las ecuaciones diferenciales por valores discretos. De esta manera se discretiza la distribución de la variable a lo largo del dominio de trabajo, obteniendo unas ecuaciones algebraicas que involucran los valores desconocidos de la variable en los puntos de mallado escogidos, conocidas como ecuaciones de Discretización. (p. 15).

Tomando en cuenta esto, la Discretización del dominio se clasifica en:

Discretización espacial

De acuerdo a investigaciones de Durán, A. (2014), la Discretización es un paso indispensable para ejecutar una simulación numérica, además:

Las posiciones discretas en las que las variables son calculadas están definidas por la malla numérica, que es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el cual debe ser resuelto el problema. La malla divide el dominio en un número finito de subdominios (...) El mallado espacial presenta mayor complejidad que el temporal, debido a que tenemos tres dimensiones, el dominio puede ser de geometría compleja y además es difícil predecir a priori en qué lugares va a ser necesario un mallado más fino. (p. 20).

La Discretización espacial del dominio es base fundamental para la ejecución del análisis CFD puesto a que es lo que define el espacio y la geometría del elemento a estudiar, siendo datos importantes ya que sin ellos el software no ejecutaría sus actividades. Evidentemente es un proceso complejo ya que se encarga de resolver el entorno en el cual se ejecutará la simulación, por lo cual el programa necesita tomar en consideración una gran cantidad de variables.

El método de Discretización espacial se clasifica en:

i. Método de elementos finitos

De acuerdo a investigaciones de Durán, A. (2014).

Utilizan la formulación débil: la ecuación diferencial es multiplicada por unas funciones llamadas funciones peso y posteriormente integradas. Son similares en cierto modo al método de volúmenes finitos. El dominio se divide en elementos y en cada uno de ellos la solución es aproximada, generalmente de forma lineal, utilizando los valores de la función en los vértices del elemento. Esta aproximación es sustituida en la ecuación integral pesada y se impone que la derivada de dicha integral con respecto al valor en cada nodo sea cero. Son apropiados para geometrías complejas y fáciles de analizar matemáticamente. (p. 21).

ii. Método de diferencias finitas

Continuando con el trabajo de Durán, A. (2014), en este método se utiliza:

La formulación diferencial de las ecuaciones. El dominio se cubre con puntos llamados nodos en los cuales la ecuación es aproximada reemplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. Cuando se aplican en mallas estructuradas son muy sencillos y efectivos. Además, es fácil obtener esquemas de alto orden. Entre sus inconvenientes están que la conservación no está garantizada si no se tiene especial cuidado y es complicada su aplicación a dominios de geometrías irregulares (p. 21)

iii. Método de volúmenes finitos

Esta metodología es según Villarroel, L. (2015) “Un método numérico utilizado para resolver las ecuaciones de gobierno de la Mecánica de Fluidos. Este método divide una geometría CAD a analizar (dominio) en un conjunto de volúmenes de control” (p. 19).

Por otra parte, Durán, A. (2014):

Utilizan la formulación integral de las ecuaciones. El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplican las ecuaciones integrales que son aproximadas mediante cuadraturas. En este caso los nodos residen en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de dichos volúmenes. Se pueden usar cómodamente en todo tipo de mallas, tanto estructuradas como no estructuradas. Otra de sus ventajas es que son conservativos por construcción y todos los términos aproximados tienen un sentido físico claro. Entre sus desventajas esta la dificultad de obtener esquemas de alto orden, sobre todo en 3D, debido a que requieren tres niveles de aproximación: interpolación, diferenciación e integración. Es el método utilizado por la mayor 'a de software CFD. (p. 21).

2.2.7.6. Condiciones de frontera.

Para la resolución de problemas mediante CFD en ocasiones se tiene que las ecuaciones de movimiento, el dominio computacional e inclusive la malla pueden ser los mismos en diferentes situaciones, teniendo en cuenta esto, el tipo de flujo que se modela se puede determinar mediante las condiciones de frontera impuestas. Es decir, se establecen únicamente las condiciones del entorno en el cual se encuentra el sistema a analizar. De acuerdo a Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006. p. 826) las condiciones de frontera aplicables a un análisis CFD son:

Condiciones de Frontera en las Superficies sólidas (Paredes)

Esta es la condición de frontera más simple para una superficie, puesto que el fluido obviamente no puede pasar a través de superficie sólida, la componente normal de la velocidad relativa con respecto a la superficie sólida se iguala a cero a lo largo de aquella cara en la cual se establece la condición de frontera. Además, debido a la condición de no deslizamiento, se fija también en cero la componente de la velocidad tangencial a una superficie sólida en reposo. Por otra parte, si se está usando un modelo de turbulencia, se resuelven las ecuaciones de transporte, y es necesario especificar la rugosidad de la superficie ya que este factor afecta en el comportamiento de a las capas límites.

Condiciones de Frontera de Flujo de entrada o de salida

Para este caso existen varias formas para definir las condiciones de frontera en aquellas partes donde el fluido entra o sale del dominio computacional. Dichas formas se clasifican en general como condiciones que especifican la velocidad o presión, además si se están resolviendo las ecuaciones de energía o turbulencia, o ambas, debe especificarse además la temperatura, las propiedades de turbulencia, o ambas.

Asimismo, para una entrada de presión se especifica la presión total a lo largo de la cara de admisión o también llamada cara de entrada al dominio computacional. De igual manera es para la salida de presión, se debe especificar la presión del fluido a lo largo de la cara de salida del dominio computacional, la cual en muchos casos es la presión atmosférica (Presión Manométrica = 0). Además, las propiedades del flujo, como la temperatura, y las propiedades de turbulencia también deben especificarse en las entradas y salidas de presión.

Por otra parte, la presión no se especifica en entradas o salidas que especifiquen velocidad y viceversa, ya que esto daría lugar a sobre-especificación matemática, ya que la presión y la velocidad se acoplan en la ecuación de movimiento. Otra opción en una salida del dominio computacional es la condición de la frontera de flujo libre a la salida, en la cual no se especifican propiedades de flujo, al contrario, las propiedades de flujo como velocidad, cantidades de turbulencia y temperatura son forzadas a tener gradientes cero normales a la cara de flujo de salida (ver figura 25).

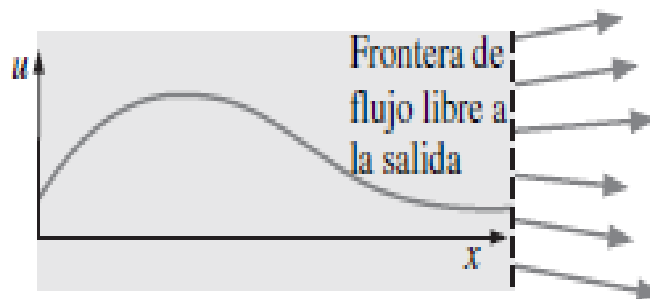


Figura 25. Condición de salida con gradiente cero.

Fuente: Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Condiciones de Frontera Interiores

Como último t3pico en el establecimiento de condiciones de frontera para un dominio computacional, se tienen las condiciones de frontera que se imponen a los par3metros que se formulan para las caras o lados que existen dentro del dominio.

Estas condiciones son necesarias para situaciones donde el dominio computacional se divide en bloques separados o zonas, y permite la comunicaci3n entre bloques. Un ejemplo de ello ser3a la condici3n de frontera de un ventilador, 3sta se especifica en un plano en el que se asigna un incremento (o disminuci3n) de presi3n repentino. El paquete CFD no resuelve detalladamente el campo de flujo no estacionario por cada una de las aspas del ventilador, sino simplemente modela el ventilador como un plano infinitesimalmente delgado en el cual se cambia la presi3n. La condici3n de frontera de ventilador es 3til, por ejemplo, en caso de un modelo simple de un ventilador dentro de un conducto (ver figura 26), un ventilador de techo en una habitaci3n o una h3lice o un motor de propulsi3n.

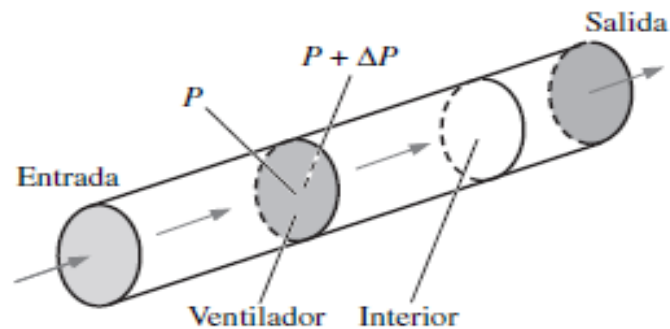


Figura 26 La condici3n de frontera de ventilador impone un cambio abrupto en la presi3n a trav3s del plano del ventilador para simular un ventilador de flujo axial en un conducto.

Fuente: Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

2.2.7.7. Modelo de Turbulencia.

Es de notar que las simulaciones de un flujo turbulento son m3s complicadas en comparaci3n a las de flujo laminar. Seg3n Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006):

La raz3n es que en la consideraci3n m3s detallada el campo de flujo turbulento siempre es no estacionario y tridimensional; las estructuras

vorticiales aleatorias, de movimiento giratorio, llamadas *remolinos*, surgen de todas las orientaciones en un flujo turbulento. En algunos cálculos de la DFC se emplea una técnica llamada *SND* (por sus siglas en inglés), donde se intenta resolver el movimiento no estacionario de todas las escalas del flujo turbulento. Sin embargo, las diferencias en tamaño y en escala de tiempo entre los remolinos mayor y menor pueden ser de varios órdenes de magnitud ($L \gg \lambda$). Además, estas diferencias se incrementan con el número de Reynolds, lo cual hace los cálculos de SND de flujo turbulento aún más difíciles a medida que aumenta el número de Reynolds. Las soluciones de SND demandan mallas tridimensionales muy finas, computadoras grandes y una enorme cantidad de tiempo del CPU (p. 840)

Evidentemente, el nivel de dificultad para una simulación detallada de un flujo turbulento es un poco elevado. Sin embargo, este no es el problema mayor de este tipo de simulación, sino la exigencia que se le hace al procesador del computador y además los resultados de SND no son factibles para problemas prácticos de ingeniería que impliquen números de Reynolds altos. En la figura 27 se muestra el comportamiento de los remolinos en un flujo turbulento.

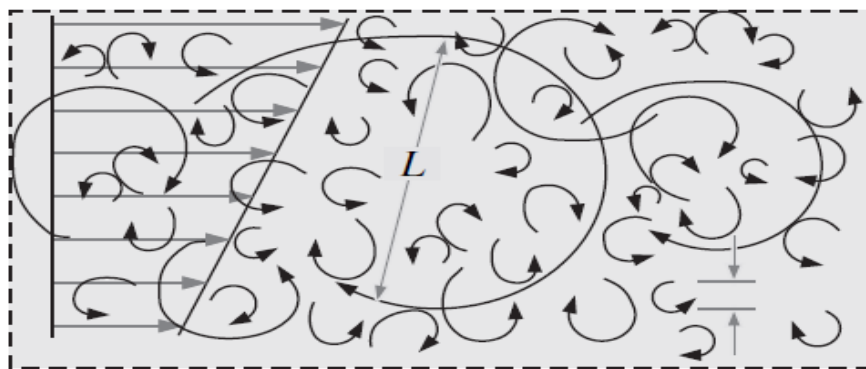


Figura 27. Flujo turbulento.
Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Por ello se hace necesario el establecimiento de algunas suposiciones que simplifiquen la simulación para campos de flujo turbulento con números de Reynolds elevados. Sin embargo, existe otro método que está en un nivel más bajo del SND el cual es *RANS* (por sus siglas en inglés). Con esta técnica, según Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006):

Se obtienen a la escala grande las características no estacionarias de los remolinos turbulentos, mientras que se modelan los remolinos turbulentos disipativos de pequeña escala. La suposición básica es que los remolinos turbulentos más pequeños son isotrópicos; es decir, se supone que los remolinos pequeños son independientes de la orientación del sistema de coordenadas y siempre se comportan de manera estadísticamente similar y predecible, cualquiera que sea el campo de flujo turbulento. (p. 841).

Básicamente se trata de obviar los remolinos de menor tamaño ya que no poseen un efecto considerable en el régimen de flujo, y además se supone que el comportamiento de ellos es similar en cualquier campo de flujo. Por otra parte, es evidente que la ejecución de este método demanda una menor cantidad de recursos computacionales respecto a los necesarios para el SND puesto a que solo se resuelven los remolinos más grandes. En la figura 28 se muestra la simplificación que se hace en el método SRG.

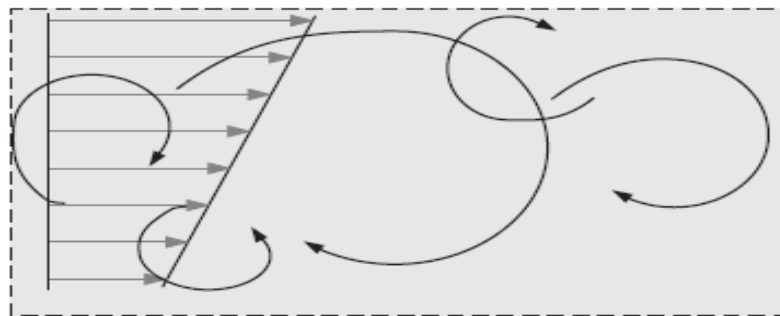


Figura 28. Simplificación del campo de flujo para una simulación SRG.

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

A pesar de que el método SRG permite hacer una simplificación bastante considerable sobre el análisis del campo de flujo, y requiere menor procesamiento computacional para llevarse a cabo, aún es un poco complicado y se busca reducir aún más la complejidad de este tipo de simulación para hacerla más factible en la resolución de proyectos de ingeniería.

Para ello se plantean entonces los métodos de simulación, en los cuales según Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006) “No se hace algún intento por resolver las

características no estacionarias de los remolinos turbulentos de ninguna escala, ni inclusive los más grandes (...) Por sencillez, se considera sólo el flujo incompresible estacionario” (p. 841). En la figura 29 se muestra esta etapa.

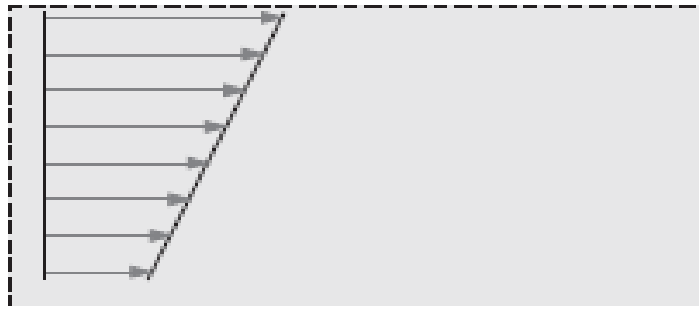


Figura 29. Consideraciones promedio para el modelo de turbulencia en análisis DFC. Se muestra un perfil de velocidad promedio. No hay remolinos turbulentos calculados.

Fuente: Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006).

Al usar un modelo de turbulencia la Ecuación de Navier-Stokes se sustituye por lo que se conoce como

por sus siglas en inglés), esta expresión se muestra a continuación.

$$(\bar{\nabla} \cdot \bar{\mathbf{V}}) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \frac{1}{\rho} \bar{\nabla} \mathbf{P}' + \nu \nabla^2 \bar{\mathbf{V}} + \bar{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij, \text{turbulento}} \quad (12)$$

Donde el término $\boldsymbol{\tau}_{ij, \text{turbulento}}$, justifica las fluctuaciones turbulentas y se conoce como

Actualmente existen numerosos modelos de turbulencia que se emplean en la actualidad. Tres de los modelos de turbulencia más populares son el modelo **k** - el modelo **k**- y el modelo **q** - . Éstos son denominados

añaden dos ecuaciones más a la formulación matemática del problema, que deben resolverse de manera simultánea con las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento lineal.

Para finalizar este tópico, se debe señalar que los modelos de turbulencia son aproximaciones dependientes de constantes empíricas para el cierre de las ecuaciones. Estos modelos se calibran con ayuda de simulación numérica directa (SND) y datos

experimentales obtenidos de campos de flujo simples. Por desgracia, ningún modelo de turbulencia se considera universal, lo que significa que, aunque el modelo funcione bien para flujos similares que se emplean para calibrar, no se garantiza dar una solución física correcta cuando se aplica a campos de flujo turbulento generales, en particular los que impliquen separación de flujo y su reapegamiento a la superficie o su dependencia del tiempo a gran escala, o ambas situaciones.

Es conveniente destacar que este enunciado es cierto sin importar qué tan fina se hace la malla computacional. Cuando se aplica la CFD a flujos laminares, con frecuencia se puede mejorar la exactitud física de la simulación refinando la malla. Éste no es siempre el caso para análisis de flujo turbulento mediante modelos de turbulencia, aunque una malla mejorada produce mayor exactitud numérica, la exactitud física de la solución está limitada siempre por la exactitud física del modelo de turbulencia como tal.

2.2.7.8. Convergencia de la Simulación por criterio de RMS

Según Duarte, A. y Montevideo, N. (2011), el residuo Raíz Cuadrada Media o RMS (Root Mean Square, por sus siglas en inglés):

Consiste en sumar todos los residuos del dominio, determinar la media de los residuos y por último calcular la raíz cuadrada de la media obtenida. Una medida de cuán bien converge la solución puede ser obtenida por el trazado de los residuos para cada ecuación al final de cada intervalo de tiempo de la simulación (iteración) o “TimeStep” (p. 70).

De acuerdo a investigaciones se definen los siguientes límites para valores de RMS en la solución de problemas de ingeniería:

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

$1 \cdot 10^{-4}$ es una convergencia relativamente precisa, pero puede ser suficiente para muchas aplicaciones de ingeniería

$1 \cdot 10^{-5}$ representa una buena convergencia y usualmente suficiente para la mayoría de aplicaciones de ingeniería.

$1 \cdot 10^{-6}$ o menor representa una convergencia bastante alta y es ocasionalmente requerida para problemas sensibles a la geometría. En muchos casos no es posible obtener este nivel convergencia, particularmente utilizando un programa de solución de ecuaciones de precisión simple.

2.3. Definición de Términos Básicos.

A continuación, se describen algunos conceptos resaltantes que se muestran en las bases teóricas, los cuales son de utilidad para comprender más fácilmente el tema a tratar:

Codos: Es un accesorio que se instala entre dos longitudes de un tubo para permitir un cambio de dirección, el cual puede ser a 90° , 45° , etc.

Densidad: Es una magnitud referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de sustancia.

Iteración: Significa repetir varias veces un proceso con la intención de alcanzar la meta deseada. En matemática, se refiere al proceso de iteración de una función, es decir, aplicando la función repetidamente, usando la salida de una iteración como la entrada a la siguiente.

Presión: Es una magnitud que relaciona la fuerza con la superficie sobre la cual actúa, es decir, equivale a la fuerza que actúa sobre la superficie.

Reducciones: Accesorio que permite la unión de tuberías de diferente diámetro, en este caso sirve para reducir el área por donde circula el fluido.

Simulación: Es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar al término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por un sistema o un conjunto de ellos, para el funcionamiento del sistema.

Tees: Accesorio en forma de “T” que permite realizar una conexión a tres tramos de tubería.

Tubería: Es un conducto que cumple la función de transportar fluidos.

Vector: Magnitud física definida en un sistema de referencia que se caracteriza por tener módulo (o tamaño), dirección y sentido.

Viscosidad: Es una propiedad característica de todos los fluidos, el cual emerge de las colisiones entre partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades, provocando una resistencia al movimiento. También se puede decir que la viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

Vórtices: Es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectoria de corriente cerrada. Como vórtice puede considerarse cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee Vorticidad. La vorticidad es un concepto matemático usado en dinámica de fluidos que se puede relacionar con la cantidad de circulación o rotación de un fluido por unidad de área en un punto del flujo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Una vez definido el problema, se deben establecer de forma precisa los mecanismos utilizados para el análisis de la problemática de investigación y de esta manera lograr los objetivos de la misma, así como también la descripción de cada uno de los distintos aspectos relacionados al conjunto de métodos, procedimiento y técnicas utilizados para dirigir el desarrollo y diseño de la investigación hacia su correcta realización.

A continuación, se mostrará la descripción de los aspectos que delimitaran el camino a seguir para obtener los resultados, los cuales están conformados por los siguientes tópicos: tipo de investigación que define el alcance de los objetivos, el nivel de la investigación se refiere al grado de profundidad y complejidad con el cual se desea abordar el estudio, diseño de la investigación describen los procedimientos o aspectos operativos de la misma, población, muestra y técnicas e instrumentos de recolección de datos y, por último, las fases de la investigación.

3.1. Naturaleza de la Investigación.

Con respecto al enfoque que posee la presente investigación es del tipo cuantitativo, en el cual según Baptista (2010):

Se usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías, además señalan que este enfoque es secuencial y probatorio, cada etapa precede a la siguiente y no podemos brincar o eludir pasos.

De esta manera, este tipo de enfoque es el adecuado para el desarrollo del presente trabajo, el cual busca estudiar el fenómeno de cavitación en válvulas hidráulicas de corte, permitiendo recopilar información empírica (de cosas o aspectos

que se pueden contar, pesar o medir), de manera que, sea posible la elaboración de una explicación de los resultados obtenidos.

3.2. Tipo de Investigación.

Según Rivero B. (2008), indica que:

La literatura especializada reporta variadas formas de clasificación. En este caso y según el nivel de conocimiento científico (observación, descripción, explicación) al que espera llegar el investigador, se formula el tipo de estudio, es decir de acuerdo al tipo de información que espera obtener, así como el nivel de análisis que deberá realizar. En esta clasificación también se tendrán en cuenta los objetivos y las hipótesis planteadas con anterioridad. (p.16).

Esta investigación tendrá un tipo de estudio descriptivo, el cual sirve para analizar cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno y sus componentes. Permitiendo detallar dicho fenómeno estudiado a través de la medición de una o más de sus variables siendo el objetivo de ésta estudiar el fenómeno de cavitación en válvulas hidráulicas de corte, analizando las variables que intervienen en el flujo a través de las mismas.

Para este tipo de investigación, Tamayo, M. (2003) argumenta que:

Comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o procesos de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre cómo una persona, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente (p. 46).

3.3. Nivel de Investigación.

Se define la investigación como “Una actividad encaminada a la solución de problemas. Su objetivo consiste en hallar respuestas a preguntas mediante el empleo de procesos científicos” (Cervo y Bervian, 1989, p. 41, citado en Arias F, 2006, p.21)

Esta se puede ser de distintos tipos, en este sentido se puede clasificar el tipo de investigación, y suele hacerse en función de su nivel que este se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio, y según el nivel en que se trabaje la investigación.

La presente investigación se realizará en un nivel descriptivo, la cual busca mediante el empleo de la técnica de aproximación numérica encontrar las razones o causas que ocasionan el fenómeno de cavitación que ha sido poco estudiado, de esta manera, lograr alcanzar una explicación concisa del por qué ocurre este, en qué condiciones se da y, describiendo las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo.

Al respecto de esta temática, Arias F (2006) considera:

La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere (p.24).

3.4.Diseño de investigación.

El diseño de la investigación es la que permitirá de manera clara dar los pasos en los cuales se realizará la investigación, que según Hernández (2010), argumenta:

Una vez precisado el planteamiento del problema, se definió el alcance inicial de la investigación y se formularon las hipótesis, el investigador debe visualizar la manera práctica y concreta de responder a las preguntas de investigación, además de cubrir los objetivos fijados. Esto implica seleccionar o desarrollar uno o más diseños de investigación y aplicarlos al contexto particular de su estudio. El término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea, (p. 120).

En otras palabras, el diseño de investigación es la estrategia general que se va a adoptar para responder al problema planteado, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser; Experimental, de Campo o Documental.

Teniendo como base el objetivo general de la investigación se concibe que el diseño de la actual investigación será del tipo documental, dado que, el objetivo es el estudio del fenómeno cavitación en válvulas hidráulicas de corte, empleando el uso de técnica de aproximación numérica CFD, en el cual se busca obtener y analizar datos provenientes de documentos, catálogos u otro tipo de material impreso para realizar la selección de las válvulas hidráulica de tipo corte reales e identificar sus

geometrías, esto con la finalidad de modelarla mediante una herramienta de diseño CAD y, por consiguiente, la simulación se hará mediante una plataforma CFD, donde se buscará información en textos, artículos de revistas, trabajos de grado, páginas web, cursos y tutoriales acerca del manejo del software.

3.5.Población y muestra.

3.5.1. Población.

En cuanto a la población Arias, F. (2006) argumenta:

Una característica del conocimiento científico es la generalidad, de allí que la ciencia se preocupe por extender sus resultados de manera que sean aplicables, no sólo a uno o a pocos casos, sino que sean aplicables a muchos casos similares o de la misma clase. En este sentido, una investigación puede tener como propósito el estudio de un conjunto numeroso de objetos, individuos, e incluso documentos. A dicho conjunto se le denomina población (p. 81).

La población, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio, se tiene una clasificación en la cual se puede encontrar: Población finita, Población infinita y, por último, población accesible, también denominada población muestreada, la cual se define como, “ la porción finita de la población objetivo a la que realmente se tiene acceso y de la cual se extrae una muestra representativa, el tamaño de la población accesible depende del tiempo y de los recursos del investigador”.(Ary y otros, 1989 citado por Arias, F. 2006 p.82)

Dicho esto, la población de la actual investigación será, el tipo de población accesible, las cuales serán las diferentes curvas típicas generadas mediante la herramienta de dinámica de fluidos computacional o CFD, las cuales representaran las variables que intervienen en el campo de flujo a través de válvulas hidráulicas de corte que se desea estudiar. El término población se refiere a “...cualquier conjunto de elementos de los que se quiere conocer o investigar alguna o algunas de sus características.” (Alcaide, citado por Balestrini, 2001).

3.5.2. Muestra.

La muestra es un “subconjunto representativo de un universo o población” (Morles, 1994, p. 54, citado en Arias F, 2006, p.110). Consideremos ahora la muestra del presente proyecto, en el que se tendrá una muestra del tipo aleatorio simple, que según(Rivero B, 2008, p.52) “es la forma más común de obtener una muestra es la selección al azar. Es decir, cada uno de los individuos de una población tiene la misma posibilidad de ser elegido”, el muestreo aleatorio simple es la selección de la muestra que se realiza en una sola etapa, directamente y sin reemplazamientos. Se aplica fundamentalmente en investigaciones sobre poblaciones pequeñas y plenamente identificables, por tanto, la muestra correspondiente a la investigación son las diferentes curvas típicas generadas mediante la herramienta de dinámica de fluidos computacional o CFD.

3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Este punto a tratar Tamayo, M. (2003) lo define como:

La recolección de los datos depende en gran parte del tipo de investigación y del problema planteado para la misma, y puede efectuarse desde la simple ficha bibliográfica, observación, entrevista, cuestionarios o encuestas y aun mediante ejecución de investigaciones para este fin. (p. 182).

En otras palabras, se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información, las técnicas son particulares y específicas de una disciplina, por lo que sirven de complemento al método científico, el cual posee una aplicabilidad general.

Una vez delimitado el problema y definido el tipo, nivel y diseño de investigación realizado, es hora de definir las técnicas e instrumentos de recolección de datos pertinentes para verificar las hipótesis o responder las interrogantes formuladas. Todo en correspondencia con el problema, los objetivos y el diseño de investigación.

En el presente proyecto se utilizó como técnica de recolección de datos la revisión documental, la cual consiste en la selección y recopilación de información

mediante documentos impresos y materiales bibliográficos, esto con el fin de investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de válvulas hidráulicas de corte, así como también determinar los modelos matemáticos y leyes fundamentales que definen este proceso.

Esta técnica se realizará con el fin de profundizar la información recopilada con todas las aplicadas anteriormente, esta comprende la búsqueda de la información de documentos empresariales, que contribuyan al conocimiento del comportamiento de sucesos realizados que sirvan de apoyo para el desarrollo de teorías pertinentes para la resolución de problemas, de acuerdo con Candelo (2006).

La recolección de datos revisados abarca desde publicaciones científicas en el área de la mecánica de fluidos, artículos en revistas, investigaciones particulares, trabajos de grado y páginas web especializada en el área.

Para concluir se definirá el instrumento utilizado, que es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información. Este trabajo se contará con la utilización de computadoras que permiten la adecuada recolección de datos para la redacción del presente trabajo, además, la ejecución de software de simulación para la obtención de curvas típicas que describen el fenómeno de cavitación en válvulas.

3.7. Fases de la Investigación

Por lo que se refiere a fases de la investigación, en este punto se describirá de manera dividida las fases, respectivas acciones, actividades, técnicas y procedimientos empleados para cumplir con cada uno de los objetivos específicos ya planteados, de esta manera se facilita al investigador el avance para con cada objetivo permitiéndole administrar el tiempo y esfuerzo necesario, a fin de manejarlos para la realización de cada uno de estos, y de esta manera, lograr de forma efectiva con el objetivo general de la investigación, la cual consta de cuatro fases las cuales son:

Fase I: Investigación acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de válvulas hidráulicas de corte.

En esta primera fase, se empleó herramientas de búsqueda de información para la ampliación de la investigación y documentación acerca de las variables causante del fenómeno de cavitación en las válvulas hidráulicas de tipo corte, así como también las desventajas o efectos que trae consigo este fenómeno, en relación a puntos mencionados anteriormente en esta fase se utilizó la herramienta de investigación bibliográfica para la recolección de datos, toda la información obtenida en esta etapa proviene de documentos digitales, información de empresas especializada en áreas de fluido y trabajos de grados, es así como se llegó al cumplimiento de este primer objetivo de manera efectiva, dando paso a la siguiente fase.

Fase II: Selección de válvulas reales e identificación sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta CAD.

La actual fase se basa en la selección de válvulas de tipo corte reales, por lo que luego de una investigación y documentación de los tipos de válvulas hidráulicas de tipo corte utilizadas con mayor frecuencia en el campo se seleccionaran tres tipos de válvulas de corte, siendo en esta investigación: válvula de bola, de compuerta y de asiento cónico, por su gran uso y por ende mayores casos en sufrir el fenómeno de cavitación. Seleccionado los tipos, se determinarán los parámetros dimensionales y condición de flujo a los que estas son sometidas con frecuencia, de ahí, se realizará la modelación de las válvulas seleccionadas, la cual se llevará a cabo mediante un software CAD.

El programa con el que se realizará esta fase de modelado CAD para las válvulas seleccionada será SolidWorks, el cual es un software para modelado mecánico en 2D y 3D, este programa posee gran fama debido a su tiempo en existencia y lo comercial que se ha vuelto, permitiendo al usuario realizar la modelación necesaria de manera efectiva y sin inconvenientes.

Fase III: Simulación del campo de flujo a través de las válvulas seleccionadas mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).

En esta fase se buscará simular el campo de flujo a través de las válvulas ya seleccionadas para su posterior análisis, mediante una herramienta de dinámica de fluido computacional CFD, el software que se empleara en el presente trabajo para hacer posible esta simulación es ANSYS®CFX, una herramienta de CFD, el cual hará posible analizar campos de flujo que pasa a través de las válvulas de corte previamente seleccionadas, se realizará la configuración del Solver de dinámica de fluidos computacional en base al modelo matemático correspondiente, con los datos requeridos insertados debidamente en el programa se procederá a realizar la simulación del estudio en cuestión, una vez efectuado este nos arrojará los resultados pertinentes que luego serán tabulados y/o graficados teniendo como resultados los parámetros que describen el fenómeno.

Fase IV: Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis.

En esta última fase del trabajo se buscará la presentación clara y concreta de los datos obtenidos en las fases anteriores, los cuales serán extraídos en forma de data, estos posteriormente se transformarán en representaciones gráficas, en donde, se verá reflejado el campamiento del flujo a través de las válvulas de corte estudiadas y mencionadas con anterioridad, estas permitirán la facilidad para su lectura y comprensión, con la finalidad de un análisis de resultados libre de dificultades.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el proceso de simulación del campo de flujo de agua a través del dominio fluidizado de una válvula de Bola, Compuerta y Asiento cónico. Para ello primeramente se verifican las estadísticas geométricas de las válvulas y su respectivo mallado, posterior a esto se muestran los resultados de la convergencia de las ecuaciones de Masa, Momento y Turbulencia, y finalmente se muestran los resultados en forma de gráficos y figuras para realizar el respectivo análisis. Cabe destacar que las simulaciones se llevaron cabo para 3 posiciones del obturador de cada una de las válvulas mencionadas los cuales se trabajan en porcentajes de apertura de 25%, 50% y 75%, además de ello se trabajó en cada posición del obturador con tres presiones de salida siendo $P_1 = 6332\text{Pa}$, $P_2 = 4749\text{Pa}$ y $P_3 = 3166\text{Pa}$.

4.1.Revisión de documentos bibliográficos acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo y en la aparición de cavitación en válvulas hidráulicas de corte

Actualmente, existe una amplia bibliografía basada en el estudio de variables y parámetros que intervienen en el comportamiento de fluidos que circulan por el interior o exterior de cualquier elemento en una red de tuberías, ya sean turbomáquinas, intercambiadores de calor, válvulas y accesorios, etc. El fenómeno de cavitación ha sido objeto de estudio por muchos años puesto a que es una situación un poco indeseada debido a las consecuencias que trae consigo, siendo algunas de ellas Desgaste en las superficies limitantes, vibración excesiva, etc.

Una vez consultada esta bibliografía se pudo obtener una serie de variables que definen de cierta forma el comportamiento del fluido (Agua) cuando pasa a través del

obturador de la válvula, en rasgos generales, la cavitación de un fluido depende de la presión y temperatura a la que se encuentre, las cuales dependen de la composición química de cada fluido, de su densidad, propiedades físicas, etc. Al tomar en consideración las condiciones a las que se somete el fluido (Agua) al pasar a través de la válvula, se determinó que las variables que intervienen en mayor medida en la formación de burbujas de cavitación son la presión en el punto aguas arriba y aguas abajo medidos desde el obturador de cada válvula, los cuales en este estudio equivalen a una distancia de 5D (5 veces el diámetro nominal de la válvula) y 20D (20 veces el diámetro nominal de la válvula), respectivamente.

Por otra parte, también interviene la caída de presión o pérdida de carga producida por la válvula, lo cual depende del porcentaje de apertura del obturador y los cambios de dirección del flujo en el interior de la válvula. Además, el flujo másico al cual se somete la válvula también afecta ya que origina cambios en la velocidad media del flujo lo cual combinado con la caída de presión puede traer consigo la formación de burbujas de cavitación.

4.2. Selección de válvulas reales e identificación de sus características geométricas para el modelado mediante una herramienta CAD

Para el diseño CAD de las válvulas se consultó el catálogo de la empresa JC Valves (es.jc-valves.com), JC Fábrica de válvulas, S.A.U, fundada en 1968, es una empresa multinacional especializada en la fabricación y comercialización de válvulas industriales de alta calidad. Esta empresa produce válvulas para todas las aplicaciones, además de que ofrece un servicio global desde asesoramiento hasta el diseño y fabricación de las válvulas. En el Anexo I se muestran las características geométricas de las válvulas que ofrece esta empresa.

4.2.1. Diseño CAD de las válvulas

Esta etapa se llevó a cabo mediante el uso del software de diseño SolidWorks®, para ello se tomaron las dimensiones del catálogo ya mencionado, definiendo un diámetro nominal de 2" (50mm). A continuación, se muestra el diseño de cada válvula (ver figuras de la 30 a la 35).

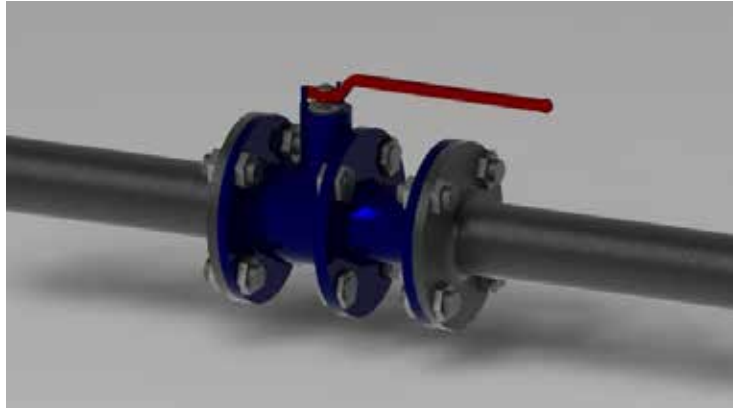


Figura 30. Geometría CAD de la Válvula de Bola.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

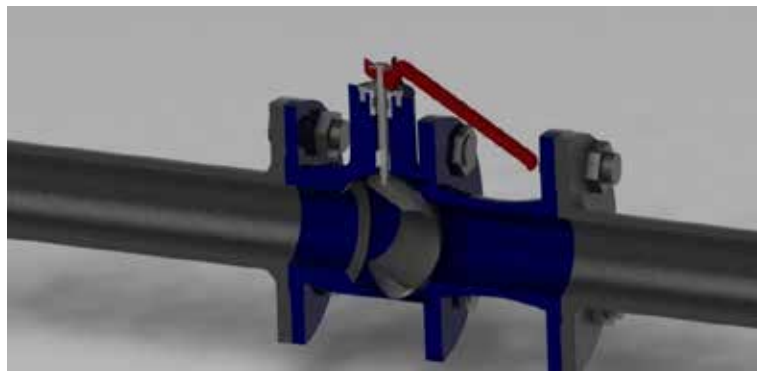


Figura 31. Sección de la Geometría CAD de la Válvula de Bola.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 32. Geometría CAD de la Válvula de Compuerta.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 33. Sección de la Geometría CAD de la Válvula de Compuerta.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 34. Geometría CAD de la Válvula de Asiento Cónico.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 35. Sección de la Geometría CAD de la Válvula de Asiento Cónico.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.2.2. Obtención del dominio fluidizado en cada válvula

Una vez definida la geometría de cada válvula se pudo definir el dominio fluidizado de cada una, para ello también se usó SolidWorks®. A continuación, se muestran los dominios de cada válvula en función del porcentaje de apertura del obturador.

4.2.2.1. Dominio Fluidizado - Válvula de Bola

En la figura 36 se muestra el dominio fluidizado correspondiente a la válvula de bola con 25% de apertura ($22,5^\circ$). La geometría para los otros dominios es similar, la diferencia está en el ángulo que se encuentra el obturador, los cuales son 50% (45°) y 75% ($67,5^\circ$).

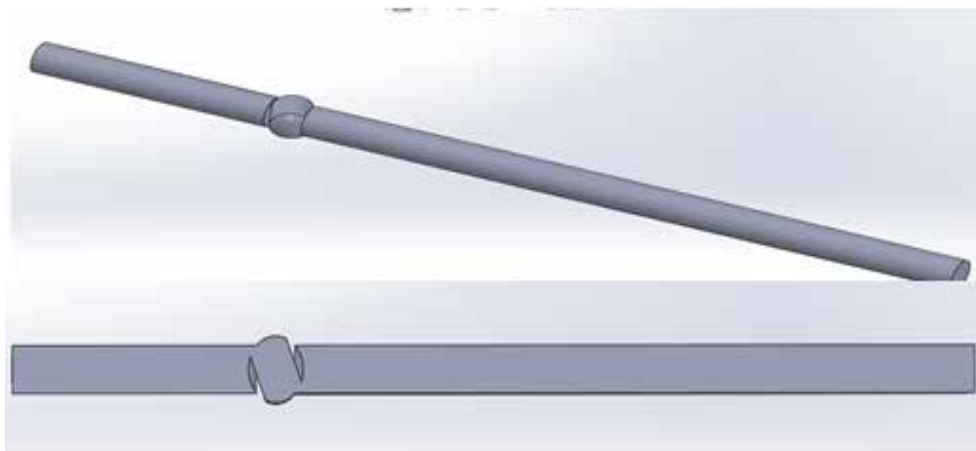


Figura 36. Dominio fluidizado de la válvula de bola con 25% de apertura.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.2.2.2. Dominio Fluidizado - Válvula de Compuerta

Seguidamente en la figura 37 se muestra el dominio fluidizado de la válvula de compuerta con 25% de apertura, teniendo en cuenta que para esta válvula la carrera del obturador es de 55mm, para este porcentaje sería una distancia de aproximadamente 13,75mm desde el borde inferior de la compuerta hasta el punto más bajo que ella toca en el cuerpo de la válvula. La geometría para los otros dominios es similar, la diferencia está en la posición que se encuentra el obturador, los cuales son 50% (27,5mm) y 75% (41,25mm).

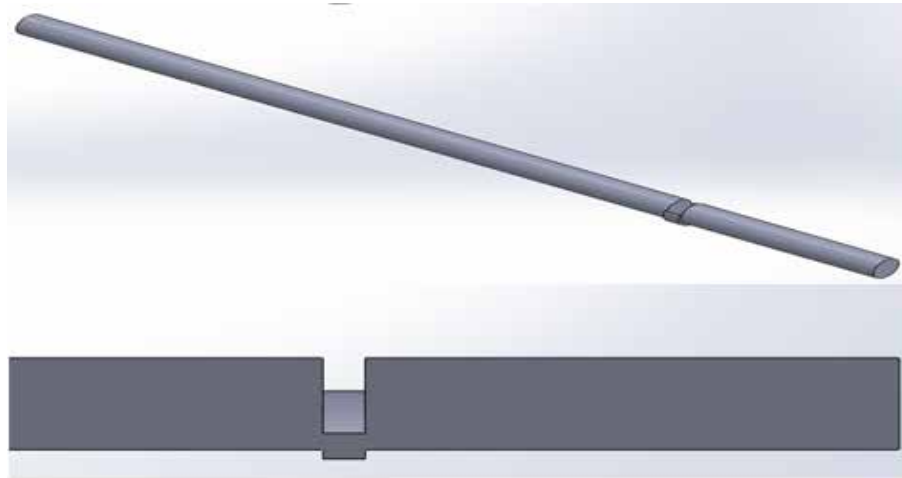


Figura 37. Dominio fluidizado de la válvula de compuerta con 25% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.2.2.3. Dominio Fluidizado - Válvula de Asiento Cónico

Finalmente, se definió el dominio fluidizado de la válvula de asiento cónico con 25% de apertura el cual se muestra en la figura 38. La carrera del obturador es de aproximadamente 56mm, con lo que para este porcentaje de apertura se tiene una longitud de aproximadamente 14mm. Al igual que en los otros casos, la geometría de los dominios solo varía en la posición del obturador, siendo 50% (28mm) y 75% (42mm).

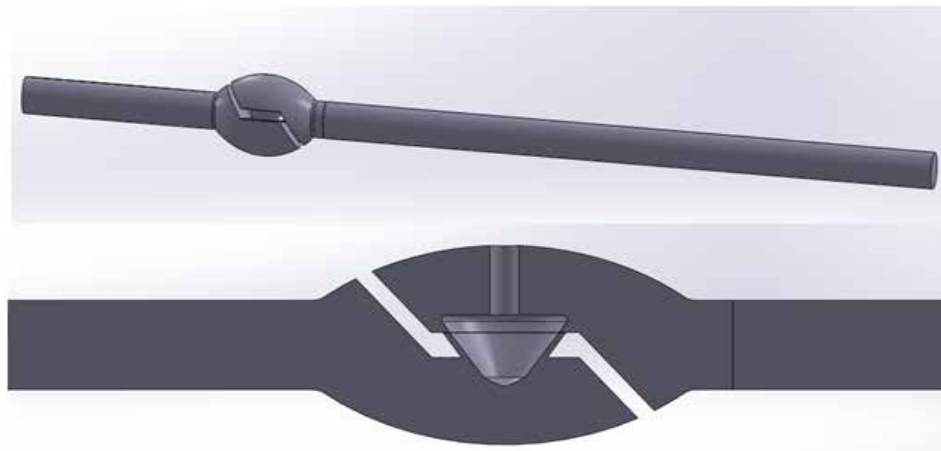


Figura 38. Dominio fluidizado de la válvula de Asiento cónico con 25% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.2.3. Importación de las geometrías de los dominios

Una vez se definió la geometría de cada dominio fluidizado, estos se guardaron en un formato IGES (*.igs) para poder vectorizarlos y acceder a ellos desde el ambiente Workbench de ANSYS®, cabe señalar que existen otros formatos compatibles con ANSYS® en esta ocasión se usó el IGES por ser el más común.

Cabe señalar que estos dominios son sólidos a los cuales se le agregan propiedades del fluido para luego discretizarlos mediante un mallado “Meshing” donde serán ejecutados los algoritmos de solución para las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo. A continuación, en la figura 39 se muestra un dominio fluidizado en el ambiente ANSYS® Workbench.

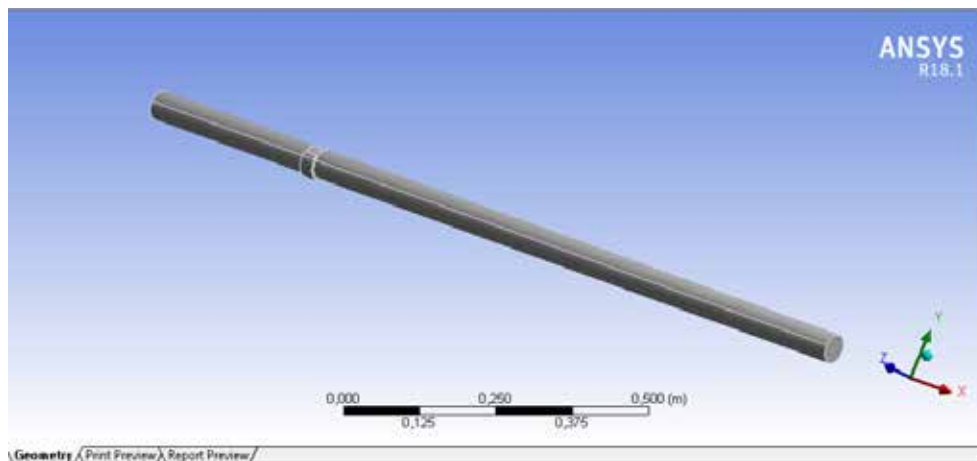


Figura 39. Dominio fluidizado en ANSYS® Workbench.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.3. Simulación del campo de flujo a través de las válvulas seleccionadas mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)

4.3.1. Selección de modelos matemáticos para la solución

Una vez se finalizó la revisión bibliográfica satisfactoria, se determinó que el modelo matemático para la realización de la simulación numérica es el conjunto formado por las ecuaciones de Navier – Stokes promediadas por Reynolds (RANS por sus siglas en inglés), el modelo de Rayleigh – Plesset para el flujo bifásico con

generación de burbujas (Cavitación) y el modelo de turbulencia del tipo k – épsilon a fin de lograr el estudio del comportamiento de la cavitación en el campo de flujo.

4.3.2. Preparación de las herramientas en ANSYS® Workbench

Antes de iniciar la secuencia de soluciones se configuró en el ambiente workbench todas aquellas herramientas necesarias para el Mallado, Solver y visualización de resultados (Ver figura 40), todas estas etapas se explican a continuación.

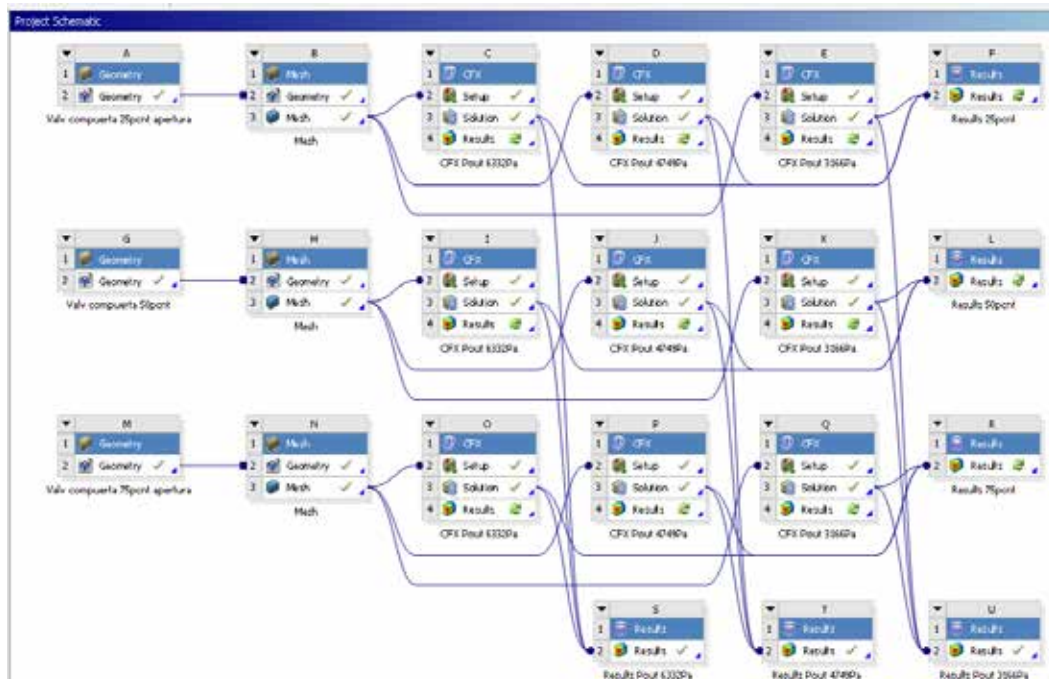


Figura 40.Esquema del proyecto en ANSYS® Workbench.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.3.3. Discretización espacial del dominio (Mallado)

Una vez definida la geometría de cada dominio fluidizado y realizado la respectiva importación al ambiente workbench de ANSYS®, se realizó la configuración del mallado “Meshing” con el respectivo programa incorporado en la herramienta CFD (ver Figura 41).

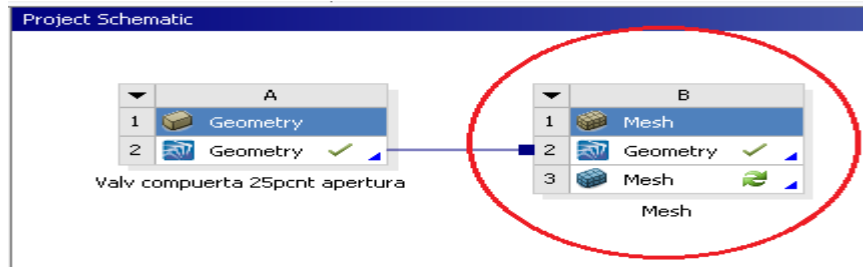


Figura 41. Programa para configurar el mallado en ANSYS® Workbench.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.3.3.1. Definición de superficies del dominio

En este punto se le asignó un nombre a cada superficie del dominio, para con ello configurar posteriormente las condiciones de frontera. Esto se ilustra en las figuras 42 a la 44. Cabe señalar que en las figuras se muestra la operación en el dominio fluidizado de la válvula de compuerta con 50% de apertura, para el resto de los dominios este paso se aplica de igual manera.

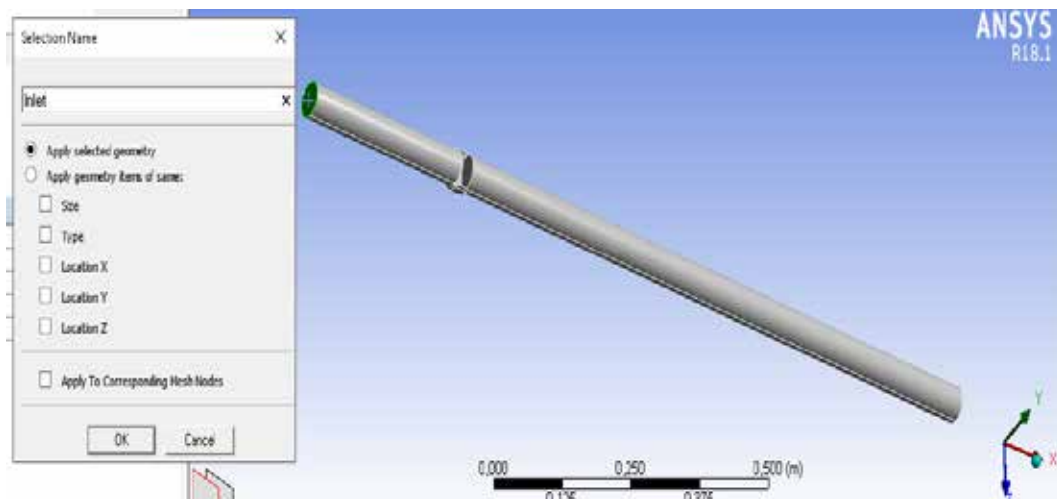


Figura 42. Sección de entrada “Inlet”.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

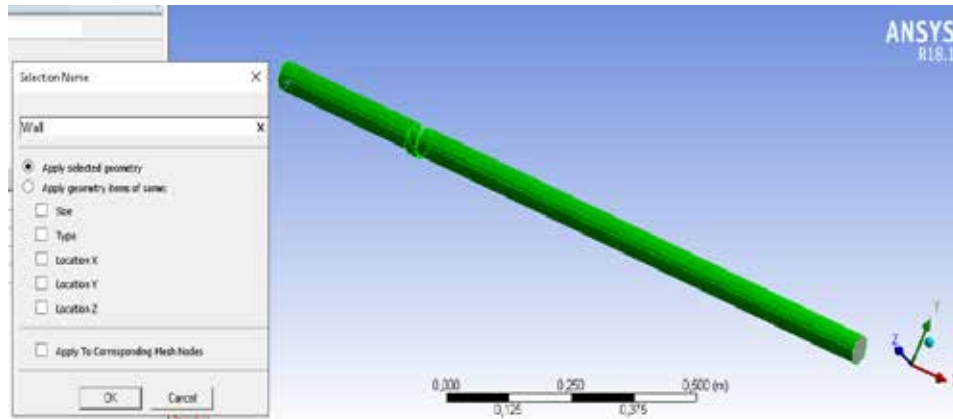


Figura 43. Pared “Wall”.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

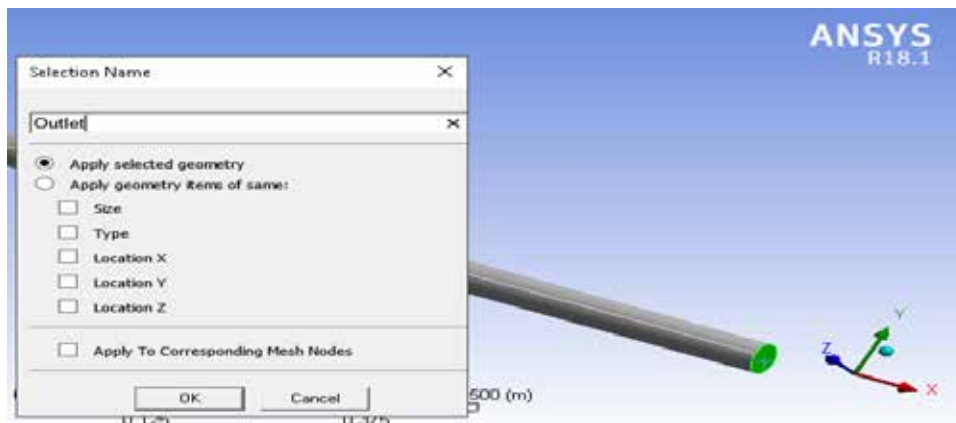


Figura 44. Sección de salida “Outlet”.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.3.3.2. Configuración del Mallado

Inicialmente se realizó la configuración de la preferencia física, la cual para este caso es CFD. Seguidamente se configura la preferencia del Solver, la cual para análisis CFD puede ser Fluent, CFX o Polyflow, para el presente trabajo se usó CFX. Una vez se realiza esta configuración el programa propone un mallado ideal como punto de partida a la cual se le aplicarán algunos cambios o ajustes de acuerdo a la

profundidad de cada estudio en particular, los parámetros de este mallado se muestran en el cuadro 4 y se ilustra en las figuras 45 y 46.

Cuadro 4. Parámetros del mallado ideal propuesto por ANSYS®

Nombre de objeto	
Estado	Resuelto
Defaults	
Preferencia física)	CFD
Preferencia del Solver	CFX
Relevancia	0
Tamaño	
Función de tamaño	Curvatura
Centro de relevancia	Tosco
Transición	lenta
Ángulo de curvatura	18,0 °
Tamaño máximo de cara	7,0397e-002 m
Altura máxima del tetraedro	0,140790 m
Longitud mínima de borde	5,8948e-003 m
Estadísticas	
Nodos	8647
Elementos	39160

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

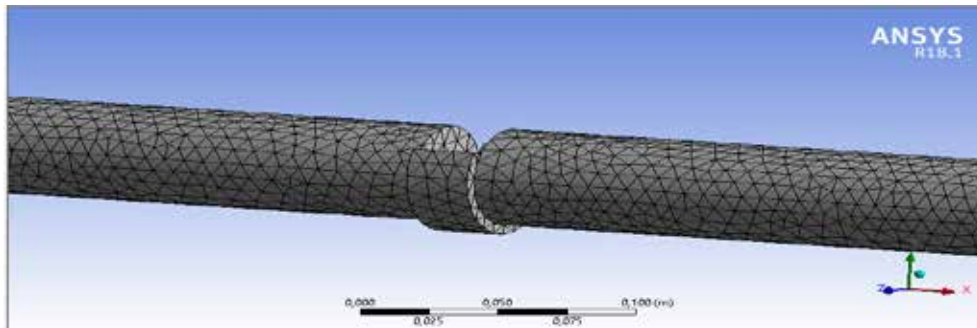


Figura 45. Mallado ideal propuesto por ANSYS®.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

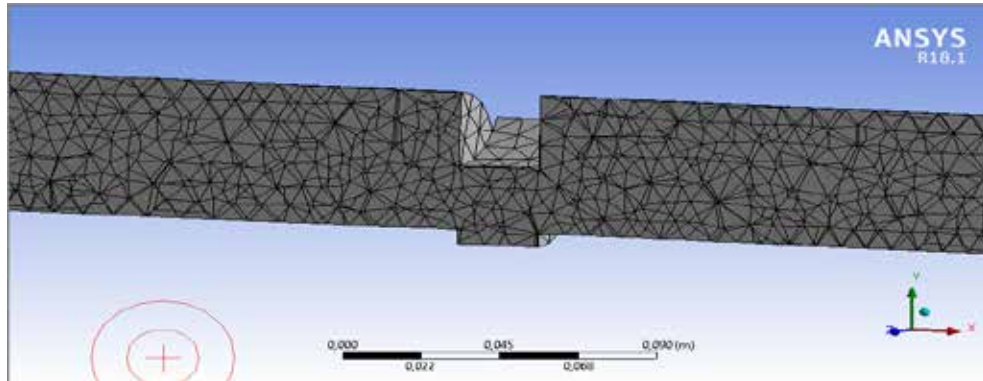


Figura 46. Sección longitudinal del mallado ideal propuesto por ANSYS®.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Para obtener resultados más precisos se realizaron ciertos cambios o ajustes que se recomiendan en el manual de ANSYS® para generar una malla un poco más refinada. Esto se llevó a cabo modificando ciertos parámetros en cuanto al tamaño y calidad de los elementos de la malla, mientras más elementos contenga la malla más precisos serán los resultados, esto se consigue aumentando la relevancia “Relevance” del mallado, además de ello se usó la configuración de proximidades y curvaturas para capturar con precisión la geometría mientras se mantiene una tasa de crecimiento suave entre estas regiones. A continuación, en el cuadro 5 se muestran los parámetros del mallado para el dominio fluidizado de la válvula de compuerta con 50% de apertura. Y en la figura 47 se muestra el resultado luego de refinar un poco la malla en conjunto con la sección longitudinal en la figura 48.

Cuadro 5. Parámetros del refinamiento de Mallado

Nombre de Objeto	
Defaults	
Preferencia Física	CFD
Preferencia Solver	CFX
Relevancia	0

Cuadro 5. Parámetros del refinamiento de Mallado – Continuación.

Tamaño	
Función de tamaño	Proximidad y curvatura
Centro de relevancia	Fino
Transición	Lenta
Angulo de curvatura	18,0 °
Tamaño máximo de cara	2,e-002 m
Altura máxima del tetraedro	2,e-002 m
Longitud mínima de borde	5,8948e-003 m
Estadísticas	
Nodos	13551
Elementos	63533

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

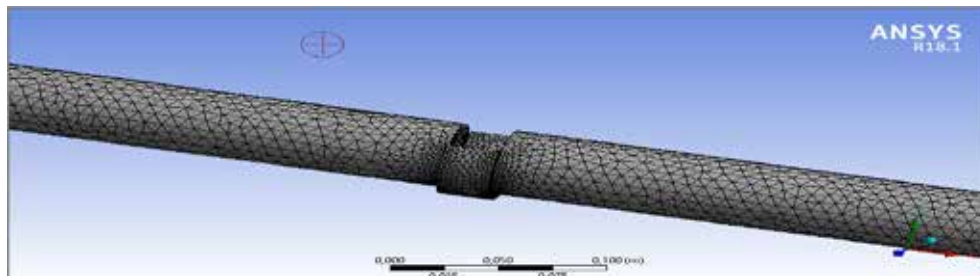


Figura 47. Mallado refinado del dominio válvula de compuerta con 50% de apertura.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

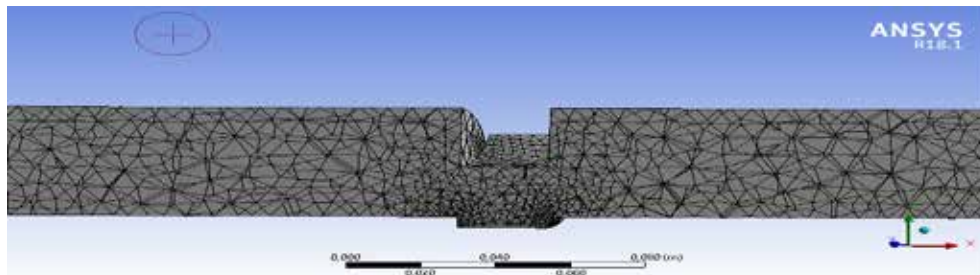


Figura 48. Sección longitudinal del mallado refinado del dominio válvula de compuerta con 50% de apertura.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.3.4. Validación de las características de la Geometría y Mallado

A continuación, en la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos en la verificación de la geometría correspondiente para cada válvula con sus porcentajes de apertura. Para ello se toman en consideración los criterios indicados en el apartado 2.2.7.4.

Tabla 2. Resultados de Verificación de Geometría y Mallado

Válvula de Bola				
Porcentaje de apertura	Ortogonalidad del mallado	Factor de expansión de caras	Aspecto de radio de la Malla	Conclusión
25%	45,5	15	11	ok
50%	39,9	15	10	ok
75%	36,5	13	10	ok
Válvula de Compuerta				
Porcentaje de apertura	Ortogonalidad del mallado	Factor de expansión de caras	Aspecto de radio de la Malla	Conclusión
25%	38	70	5	ok
50%	45	10	6	ok
75%	46.6	10	5	ok
Válvula de Asiento cónico				
Porcentaje de apertura	Ortogonalidad del mallado	Factor de expansión de caras	Aspecto de radio de la Malla	Conclusión
25%	45,4	12	5	ok
50%	39,5	16	9	ok
75%	45,4	13	5	ok

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.3.5. Condiciones de frontera

En esta etapa se asignaron todos aquellos parámetros de frontera o de borde que definirán las condiciones bajo las cuales se encuentra el fluido, inicialmente se asignó la condición para la superficie de entrada del flujo la cual se denominó “Inlet”, seguidamente se definieron las condiciones de las paredes que limitan el flujo llamadas “Wall”, luego se asignaron las condiciones para la superficie de salida del flujo “Outlet”. Esto se realizó mediante la herramienta CFX – Pre o como se denomina en el programa “Setup” (Figura 49).

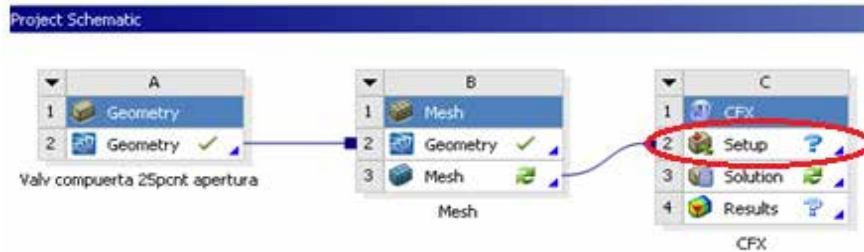


Figura 49. Herramienta para configurar las condiciones de frontera.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Seguidamente, se configuró el Pre – simulador para indicar con qué fluidos se trabaja, presión relativa, modelo de turbulencia, etc. En el cuadro 6 se muestra la configuración previa a la simulación para el dominio que se ha tomado como ejemplo de válvula de compuerta con 50% de apertura.

Cuadro 6. Parámetros para Pre - simulador

Dominio	
Tipo	Fluido
Materiales	
Agua	
Definición del fluido	Material de biblioteca
Morfología	Fluido continuo

Cuadro 6. Parámetros para Pre – simulador - Continuación.

Vapor de agua a 25°C	
Definición del fluido	Material de biblioteca
Morfología	Fluido continuo
Configuración	
Presión de referencia	1.0000 [atm]
Opciones de Multifases	Modelo homogéneo
Opciones de transferencia de calor	Modelo homogéneo, Isotérmico
Temperatura del fluido	25 [°C]
Modelo de turbulencia	k - épsilon
Par de fluidos	Agua y vapor de agua
Transferencia de masa	Cavitación
Modelo	Raleigh - Plesset

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

A continuación, en el cuadro 7 se muestran los parámetros establecidos para las fronteras que limitan el flujo para una presión de salida de 6332Pa, aclarando que para el análisis de cavitación se trabajó con 3 presiones de salida, siendo $P_1 = 6332\text{Pa}$, $P_2 = 4749\text{Pa}$ y $P_3 = 3166\text{Pa}$. Al usar la ecuación 8 descrita en la sección 2.2.4 y además de ello definir los parámetros de Velocidad media del fluido = 7m/s; Área transversal del flujo; $\times 10^{-3}\text{m}^2$; Densidad del fluido, Agua@ 25°C = 1000kg/m³. Se tiene un flujo másico de:

$$\mathbf{m = 13.74 \text{ kg/s.}}$$

Cuadro 7. Condiciones de frontera para dominio de válvula de compuerta 50%
apertura, $P_1 = 6332\text{Pa}$

Dominio	Bordes/Fronteras	
Dominio	Frontera – Inlet	
	Configuración	
	Dirección del flujo	Normal a la condición de frontera
	Turbulencia	Gradiente Cero
	Régimen de flujo	Subsónico
	Masa y Momento	Flujo másico
	Tasa de flujo másico	13,740[kg s ⁻¹]
	Turbulencia	Intensidad media y Relación de viscosidad
	Fluido	Fluido 1 (Agua)
	Fracción de volúmen	Valor
	Fracción de volúmen	9.9900e-01
	Fluido	Vapor de agua
	Fracción de volúmen	Valor
	Fracción de volúmen	1.0000e-03
	Frontera – Outlet	
	Configuración	
	Régimen de flujo	Subsónico
	Masa y Momento	Presión estática
	Presión relativa	6.332 [Pa]
	Frontera – Wall	
	Configuración	
Masa y Momento	Pared no deslizante	
Rugosidad de la pared	Pared lisa	

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Al trabajar con estas condiciones, fue posible hacer las modificaciones en la presión de salida manteniendo constante la presión de entrada para así poder observar la formación de burbujas de cavitación. Cabe destacar que la configuración de los parámetros del Pre – simulador y las condiciones de frontera son similar para el resto de los dominios que engloba el presente trabajo de investigación, la diferencia está únicamente en la presión de salida cuando se trabaje con P_2 y P_3 .

4.3.6. Configuración de la herramienta de cálculo “Solver”

Esta es la última etapa del proceso de configuración previa a la simulación, la configuración de la herramienta de solución o de cálculo “Solver” (Figura 50), es donde se establecen todos los criterios correspondientes para la convergencia de la simulación, y los que tendrá en cuenta el programa a la hora de realizar los cálculos. En la Figura 51 se muestran las especificaciones para el número de iteraciones máximas a realizar, así como el valor mínimo residual o RMS.



Figura 50. Configuración de Solver.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

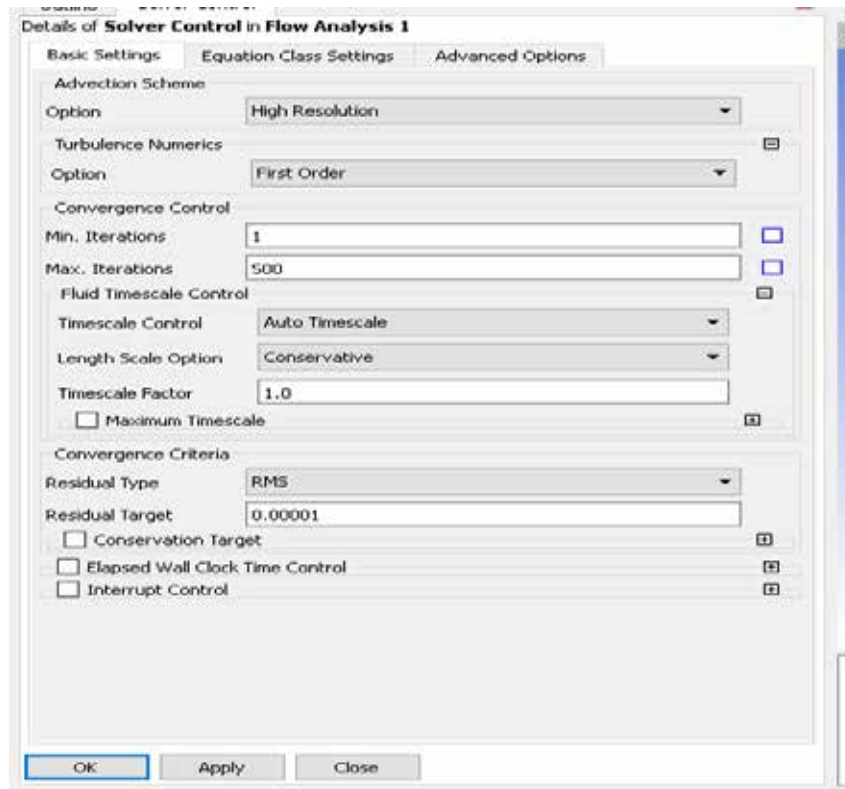


Figura 51. Parámetros del Solver.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Como punto importante, se debe resaltar que se estableció un criterio de convergencia por RMS de $1 \cdot 10^{-5}$, a fin de conseguir que los resultados sean lo más preciso posible. Al igual que los parámetros anteriores, estos también se configuran de manera similar para el resto de los dominios, la variación está en la cantidad máxima de iteraciones que se llevarán a cabo en función de la complejidad del comportamiento del fluido.

4.3.7. Inicio de la secuencia de cálculo y solución de la simulación

Ya teniendo configurados los parámetros necesarios para la puesta en marcha de la simulación se ingresa a la herramienta “Solution” del paquete CFX de ANSYS® (Ver figura 52).Luego se define el procesador que se usará para ejecutar la

simulación y si se desea aún más precisión en los resultados, seguidamente se presiona “Start Run” (Ver figura 53).

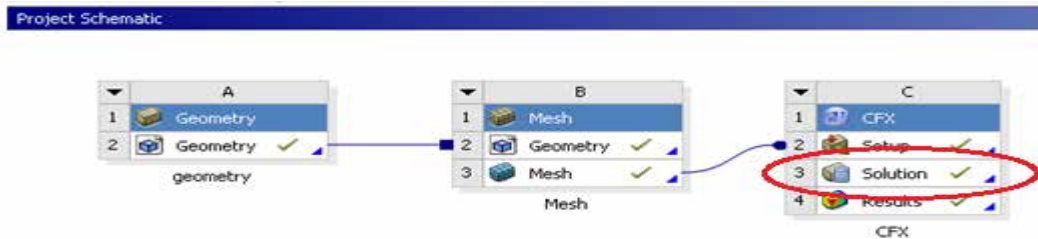


Figura 52. Herramienta Solution.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

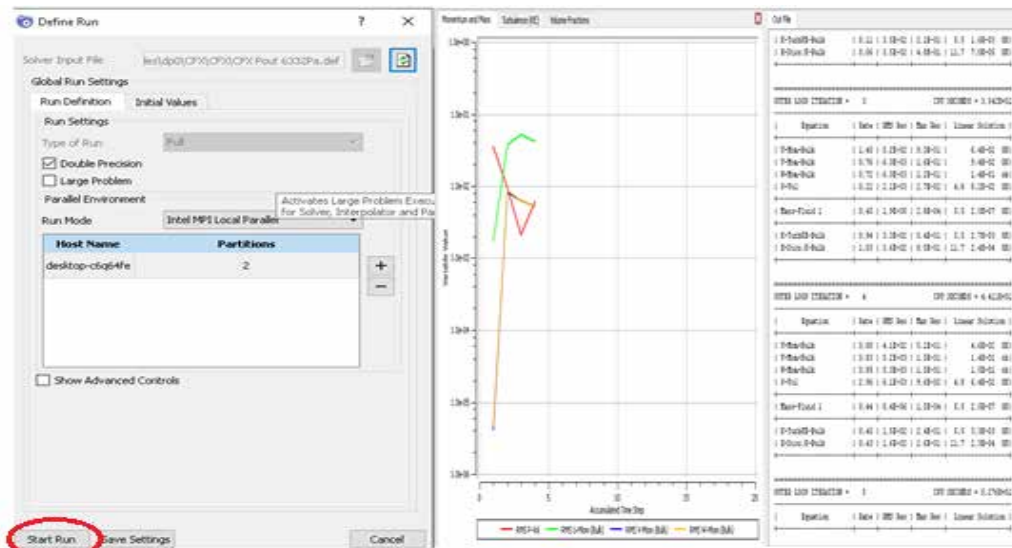


Figura 53. Inicio del ciclo de cálculo de la simulación.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

4.4. Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis

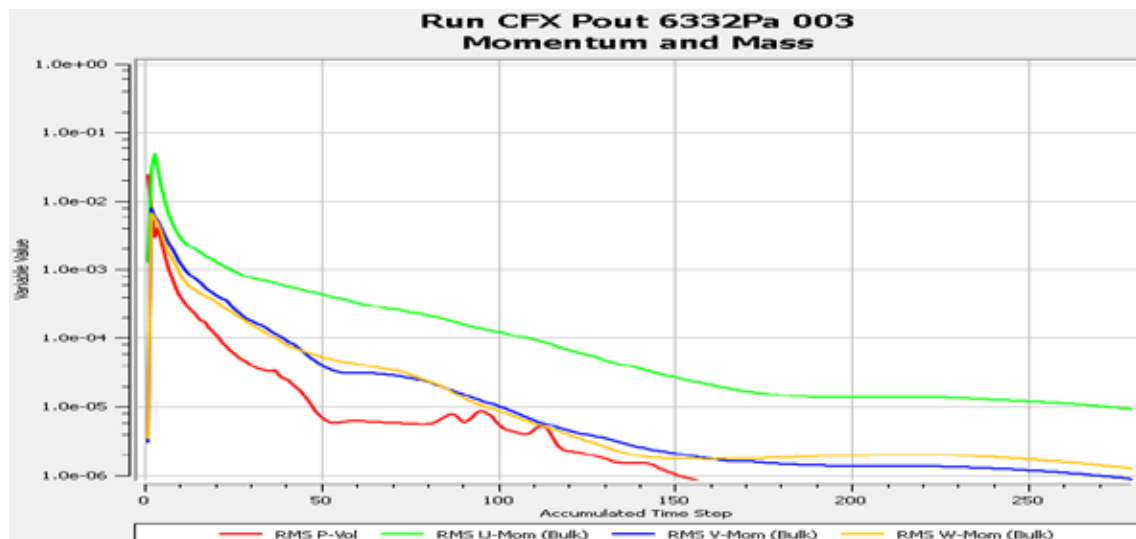
En este punto se presentan los resultados obtenidos para el análisis numérico del campo de flujo a través de la válvula de Bola, Compuerta y Asiento Cónico, primeramente, se muestran los resultados de la convergencia por criterio de RMS de las ecuaciones de Masa, Momento y Turbulencia para el dominio que se ha tomado

como ejemplo en las figuras previas, recordando que es el de la válvula de compuerta con 50% de apertura y presión de salida $P_1 = 6332\text{Pa}$, más adelante en el Apéndice I se muestran las gráficas de convergencia para el resto de los dominios fluidizados que engloban el presente trabajo.

Seguidamente, se muestran los resultados en la sección 4.4.2. en cuanto a velocidad, cambios de presión y porcentaje de vapor para cada dominio con sus respectivas gráficas. Además de ello se incluyen las figuras que indican el comportamiento de las líneas de flujo para cada válvula.

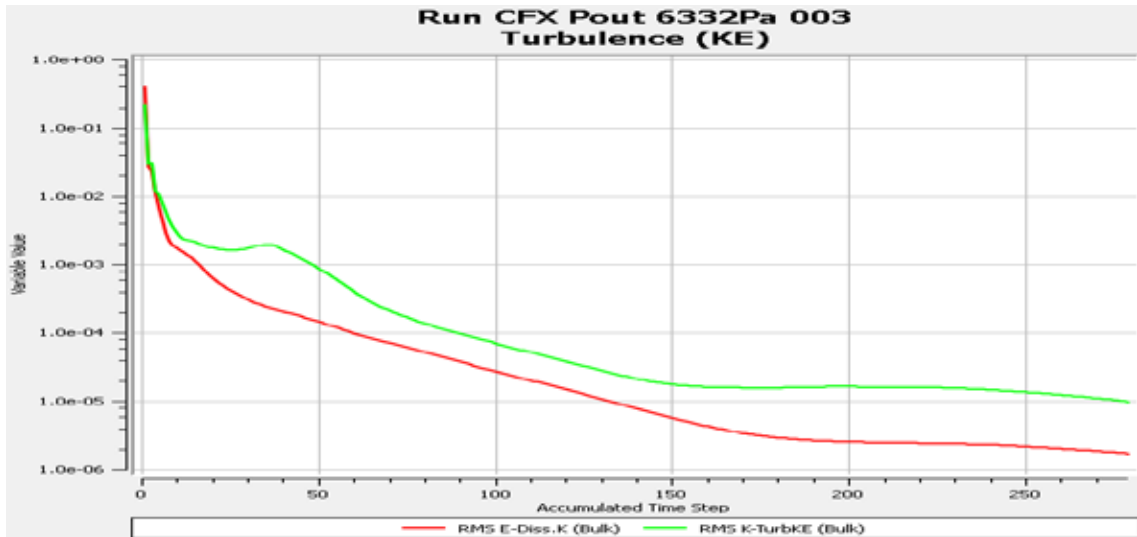
4.4.1. Convergencia de la simulación

Una vez iniciado el proceso de solución, la simulación se detendrá y por lo tanto convergerá una vez se hayan cumplido cualquiera de las premisas mencionadas previamente en la sección 2.2.7.8.A continuación, en la gráfica 1 se muestra la convergencia para las ecuaciones de Masa y Momento y posteriormente en la Gráfica 2 se muestra la convergencia del modelo de turbulencia, estos gráficos son arrojados directamente desde ANSYS® luego de ejecutar la solución de las ecuaciones.



Gráfica 1. Convergencia de las ecuaciones de Masa y Momento para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 50% de apertura, $P_{\text{salida}} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

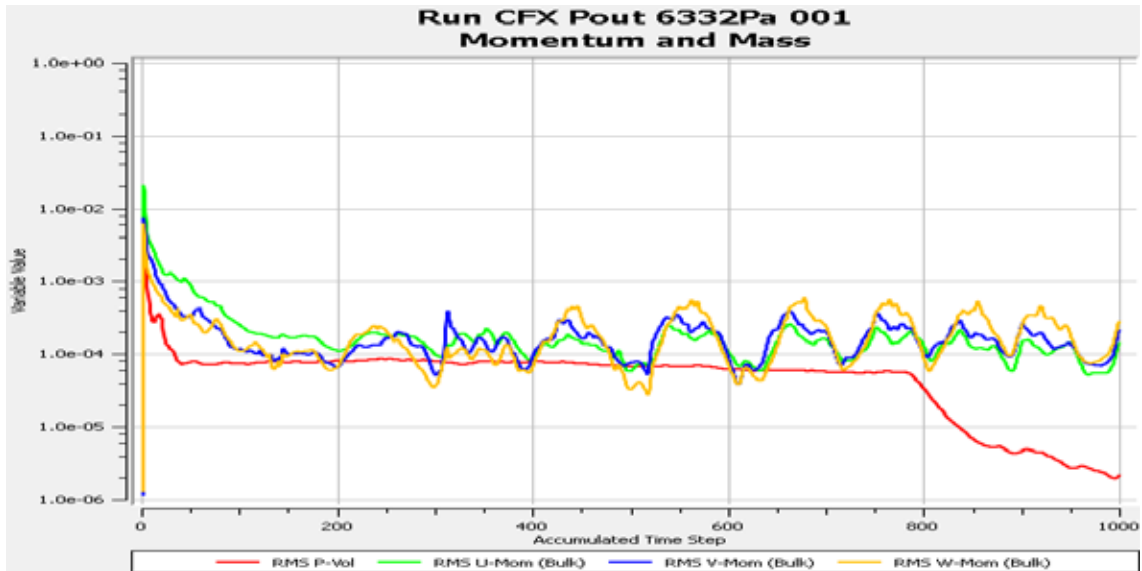


Gráfica 2. Convergencia del modelo de turbulencia k -épsilon para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 50% de apertura, $P_{\text{salida}} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

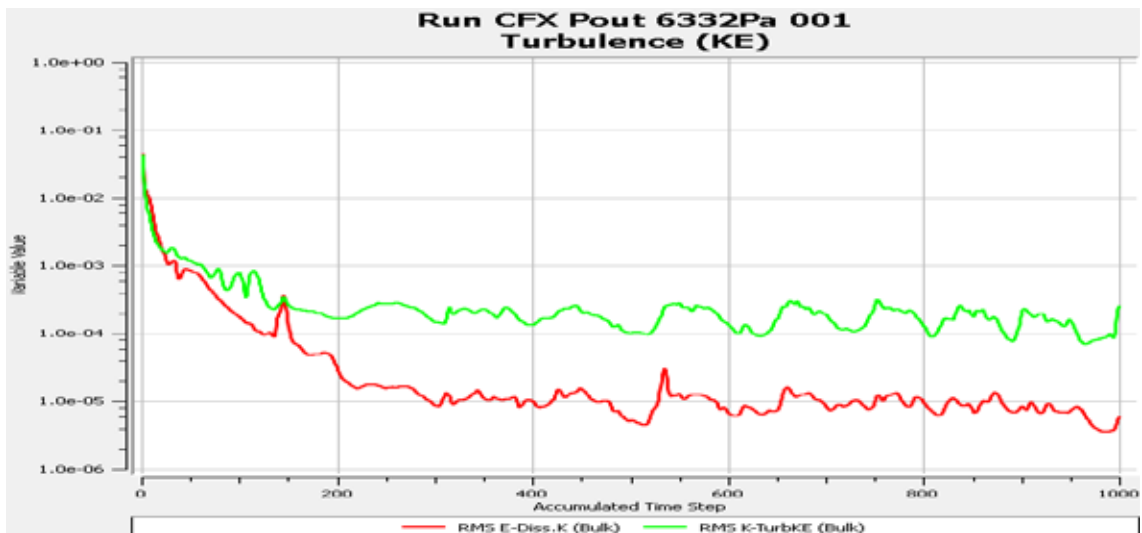
Al observar estos gráficos, es de notar que en la solución de estas ecuaciones se logró llegar al valor RMS de $1 \cdot 10^{-5}$, lo que quiere decir que los resultados tienen buena precisión y son extremadamente conservadores respecto a la recomendación de ANSYS® de $1 \cdot 10^{-4}$, además de ello, la convergencia tuvo lugar en 276 iteraciones de las 500 que se programó el Solver para ejecutar. Este análisis es análogo para los demás casos de estudio como se mencionó previamente al inicio de este punto. En el Apéndice se encuentran los gráficos de convergencia para todos los dominios del presente trabajo.

Por otra parte, en las Gráficas 3 y 4 se observa un resultado de convergencia un tanto diferente al mostrado en las gráficas 1 y 2, este es para el dominio de la misma válvula de compuerta, pero en esta ocasión con 25% de apertura e igualmente una presión de salida de 6332 Pa.



Gráfica 3. Convergencia de las ecuaciones de Masa y Momento para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 25% de apertura, $P_{salida} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



Gráfica 4. Convergencia del modelo de turbulencia k -épsilon para dominio fluidizado de válvula de compuerta con 25% de apertura, $P_{salida} = P_1 = 6332\text{Pa}$, $m = 13.74 \text{ kg/s}$.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Se puede apreciar algunas ecuaciones de turbulencia alcanzan valores de RMS entre $1 \cdot 10^{-3}$ y $1 \cdot 10^{-4}$, así como otras si alcanzan el rango de $1 \cdot 10^{-5}$. Para este caso se fijaron 1000 iteraciones para el proceso de solución, pero evidentemente no se alcanzó el nivel de precisión que se obtuvo para 50% de apertura, esto se produce debido a la complejidad de la solución por tener flujo de fluidos bifásicos. Sin embargo, al tomar en cuenta los criterios definidos previamente para la convergencia de soluciones, se podría decir que se tiene una precisión aceptable para la profundidad del estudio en el presente trabajo.

4.4.2. Visualización de resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos luego del proceso de solución, inicialmente se muestran los resultados correspondientes a la válvula de Bola, seguidamente los de la válvula de compuerta y finalmente para la válvula de asiento cónico. Además, se presentan los gráficos que muestran los cambios de Presión, Velocidad y Fracción de vapor a lo largo de la trayectoria del flujo. Finalmente se muestra el comportamiento de las líneas de flujo en cada válvula.

4.4.2.1. Dominio Fluidizado de Válvula de Bola

En este apartado se presentan los resultados de la simulación del campo de flujo a través de la válvula de bola. Inicialmente se presenta el comportamiento de la presión, seguido de la velocidad y Cavitación, todo ello con sus respectivos gráficos, así como también se muestra el comportamiento de las líneas de flujo a través de esta válvula.

Comparación de resultados en función del porcentaje de apertura

Presión de Salida 6332Pa

Presión

A continuación, se muestra el comportamiento de la presión a lo largo de la trayectoria del flujo (Ver figura 54 y 55).

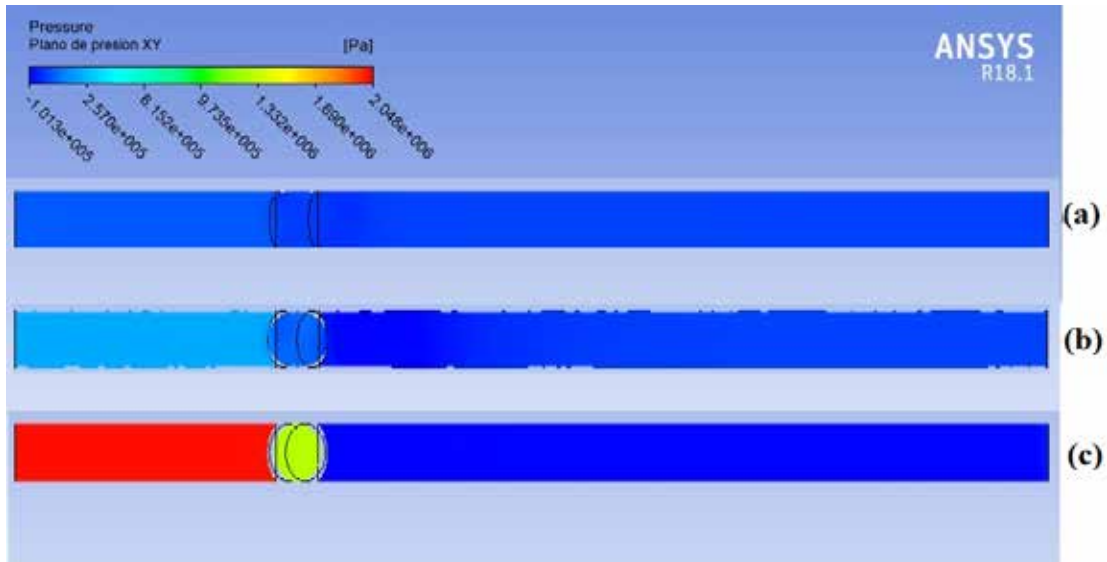


Figura 54. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

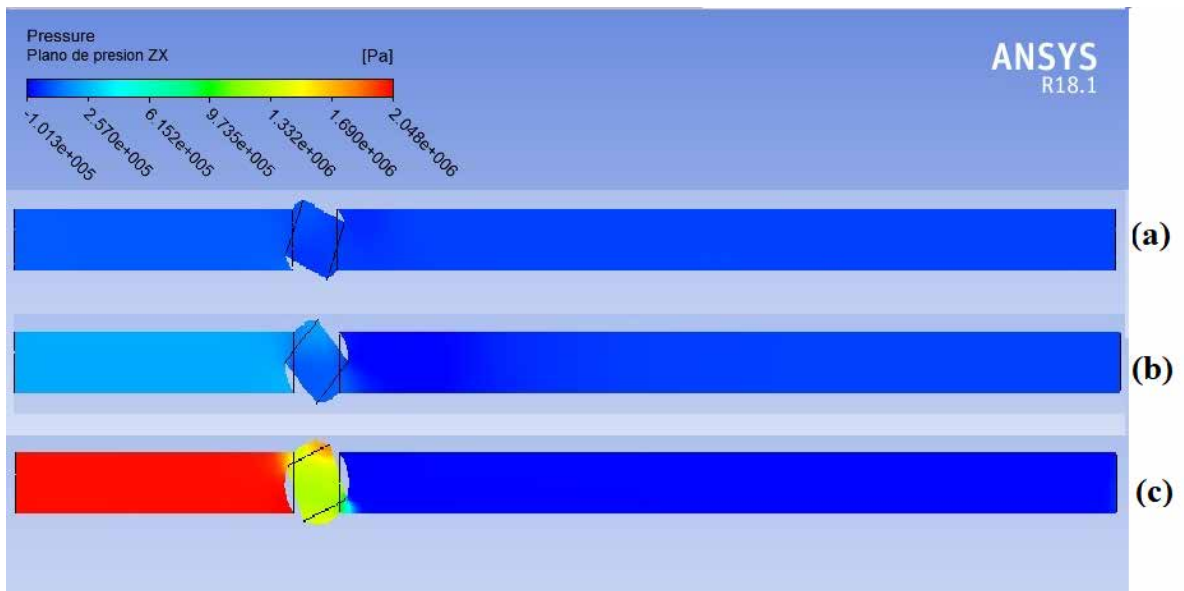


Figura 55. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Al observar el contorno de presión en el Plano XY y en XZ es de notar la caída de presión que se produce cuando el agua pasa a través del obturador, esto también se

conoce como pérdida de carga. Conforme se obstruye el paso del fluido mayor es la diferencia de presión entre el punto aguas arriba y aguas abajo.

Velocidad

A continuación, se muestra la variación de la velocidad del flujo a lo largo de su trayectoria (Ver figura 56 y 57).

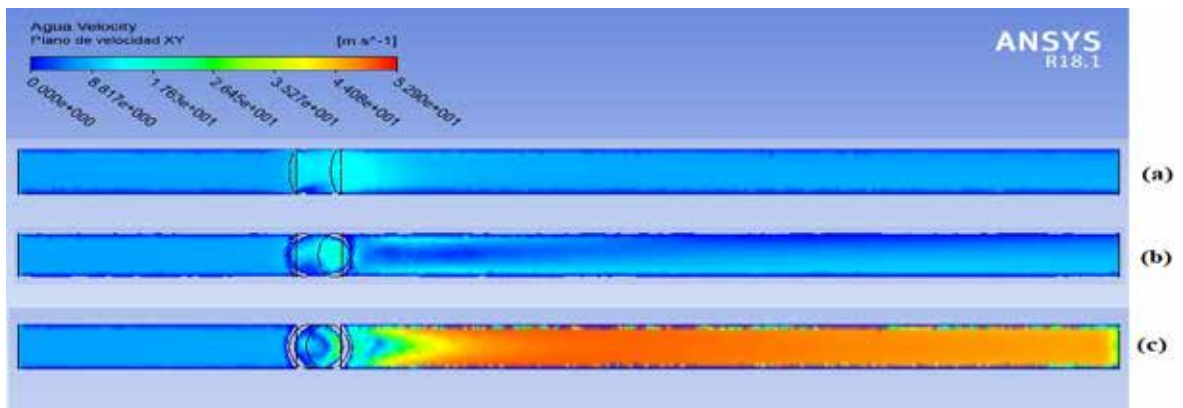


Figura 56. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

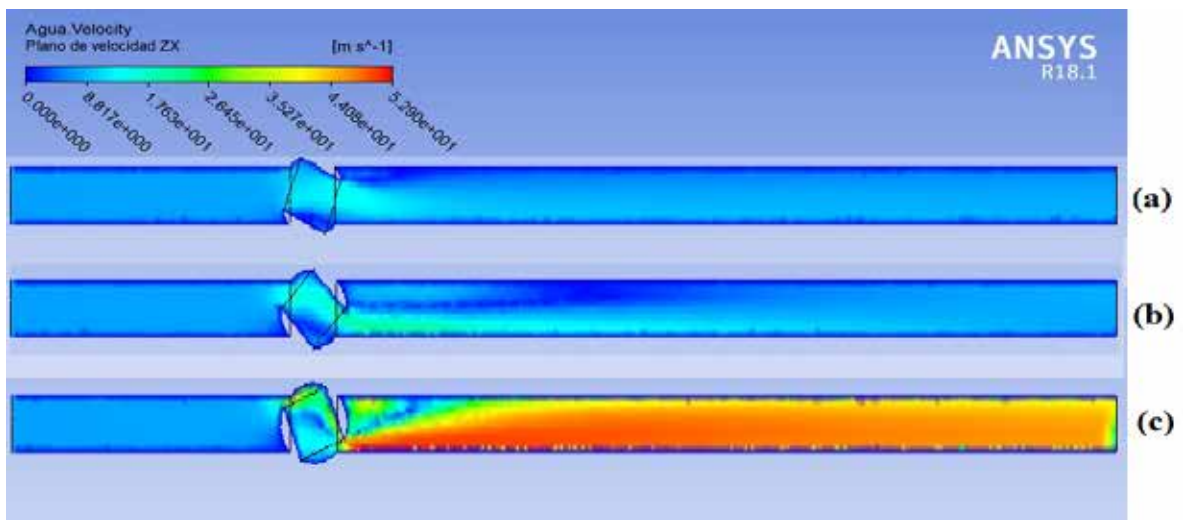


Figura 57. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Para estas figuras se puede observar como la velocidad aumenta considerablemente a medida que se obstruye el paso del flujo a través de la válvula, esto viene acompañado de la caída de presión que se observó previamente.

Fracción de Vapor

En esta parte, se muestra la formación del vapor a lo largo de la trayectoria del flujo (Ver figura 58 y 59).

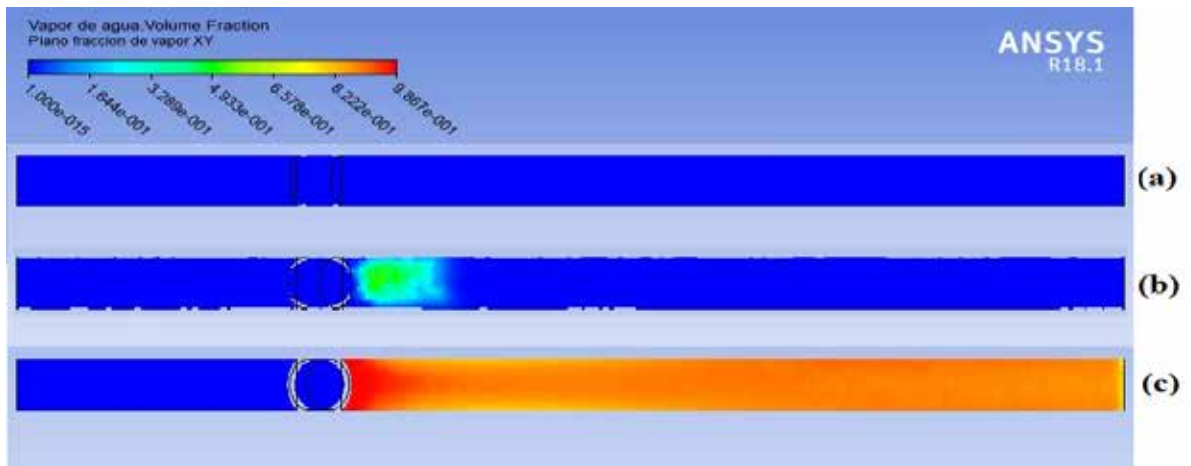


Figura 58. Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

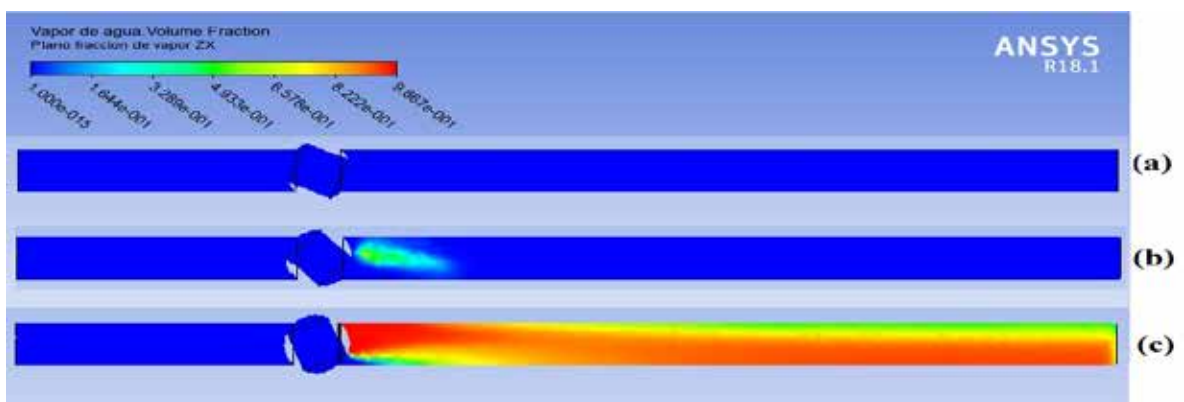
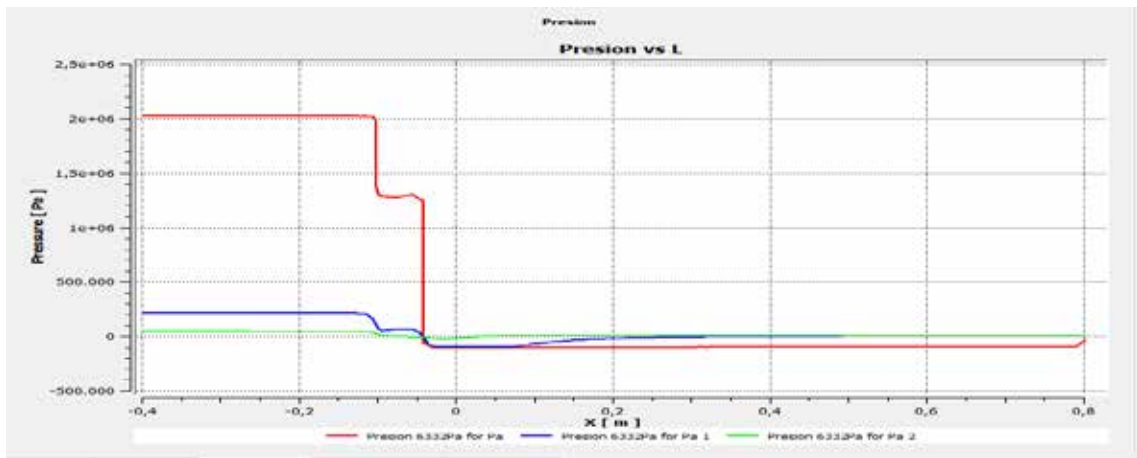


Figura 59. Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Al observar estas figuras, es de notar la elevada formación de vapor cuando el paso del flujo está casi totalmente obstruido, generando esto indicios de los factores claves que intervienen en la formación de cavitación en las válvulas.

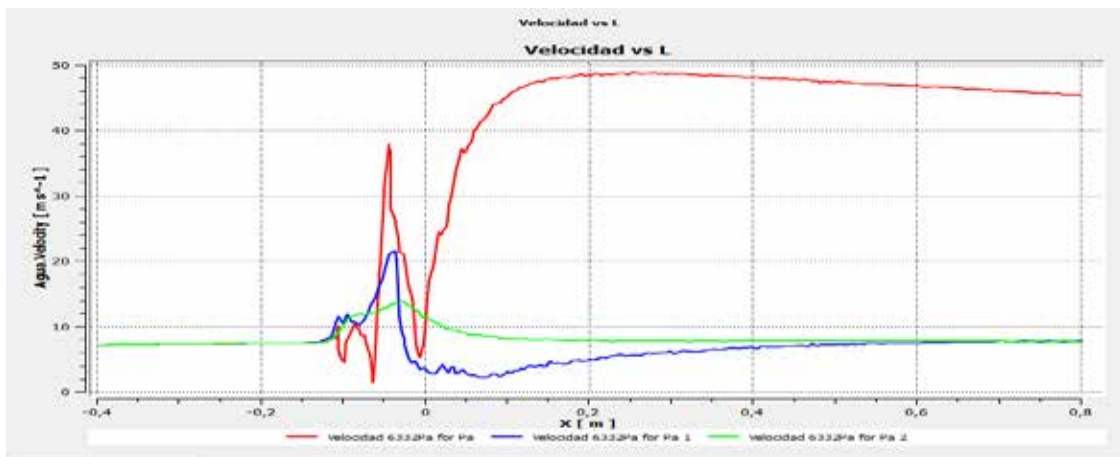
Gráfico Presión vs L



Gráfica 5. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

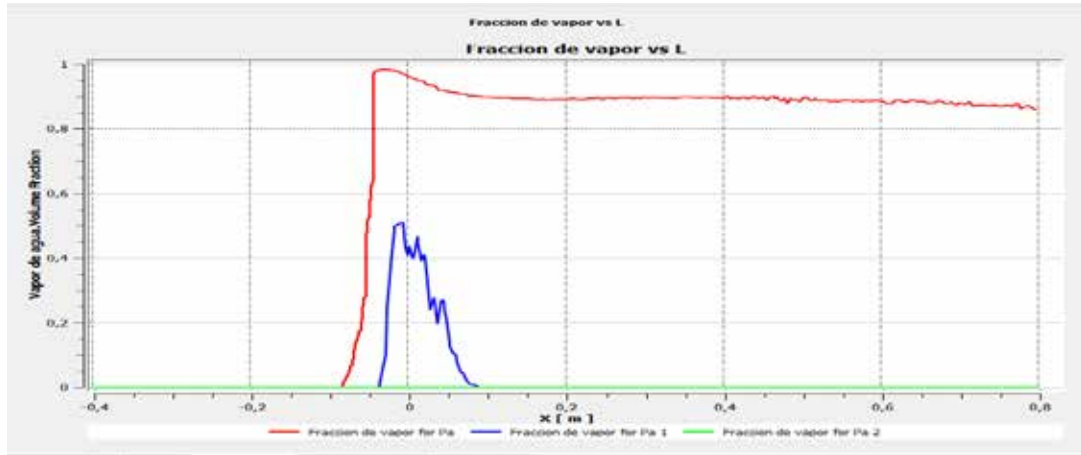
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 6. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 7. Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019)

Para evitar la repetitividad de análisis en esta sección del trabajo, se muestran secuencialmente los resultados y al final se realiza el análisis general de lo obtenido en el proceso de simulación

Presión de Salida 4749Pa

Presión

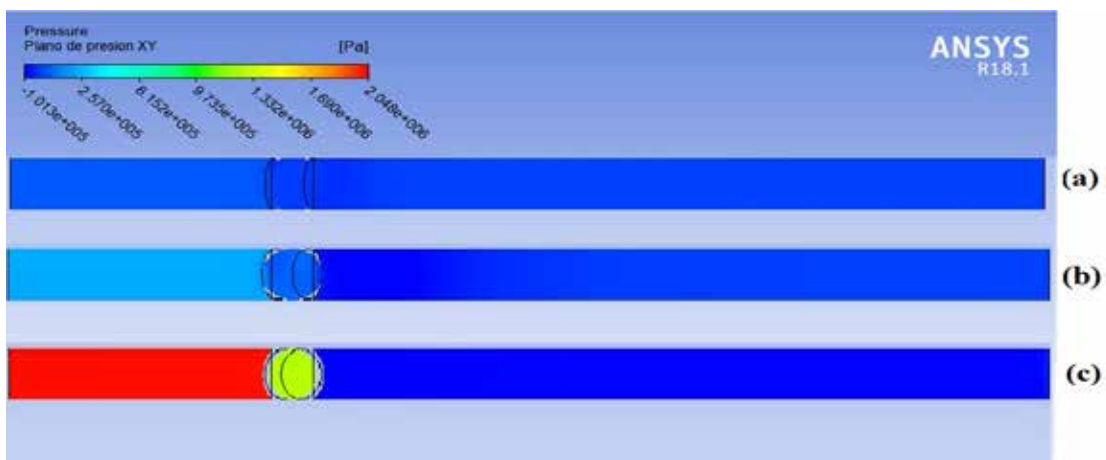


Figura 60. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

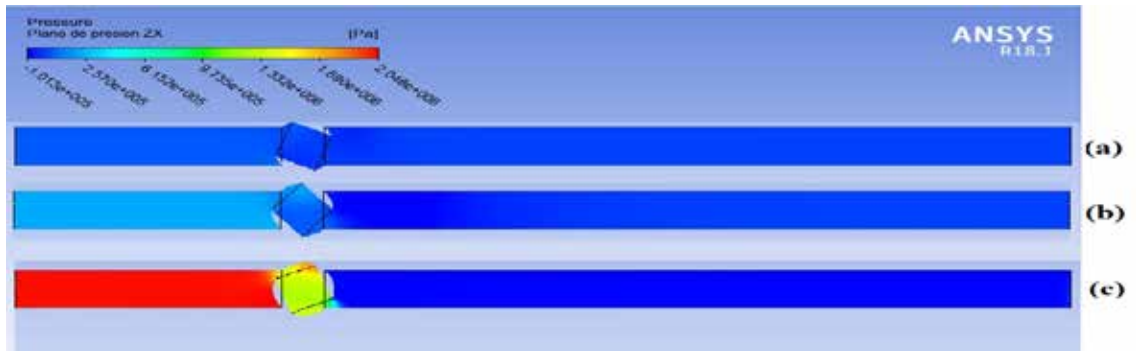


Figura 61. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

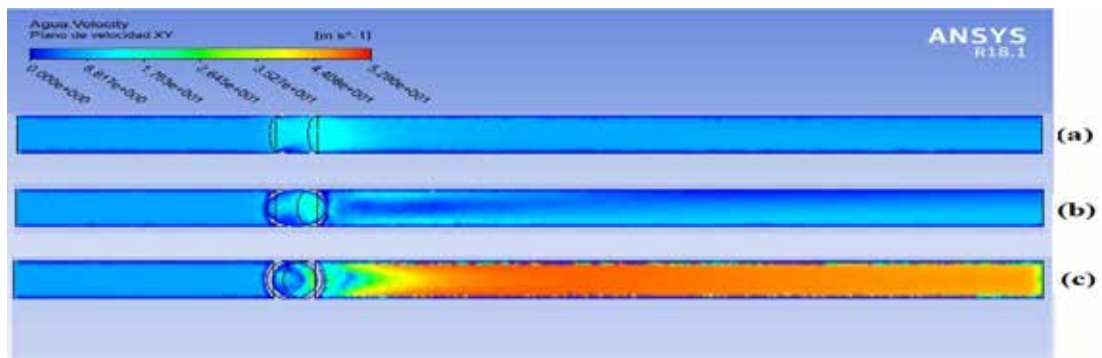


Figura 62. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

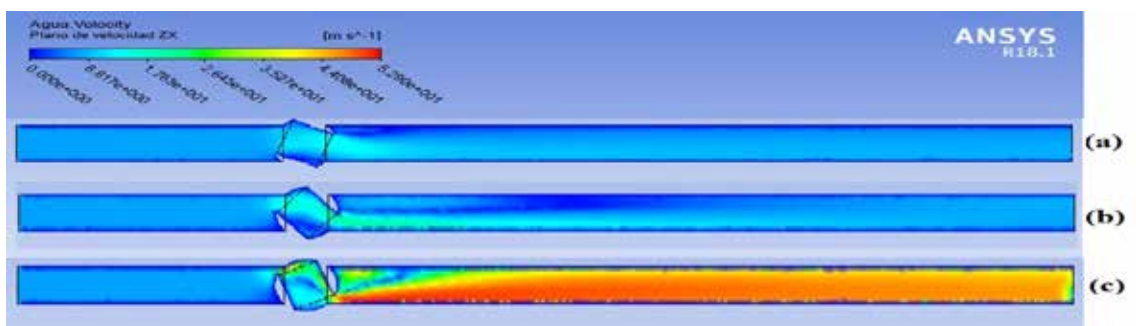


Figura 63. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

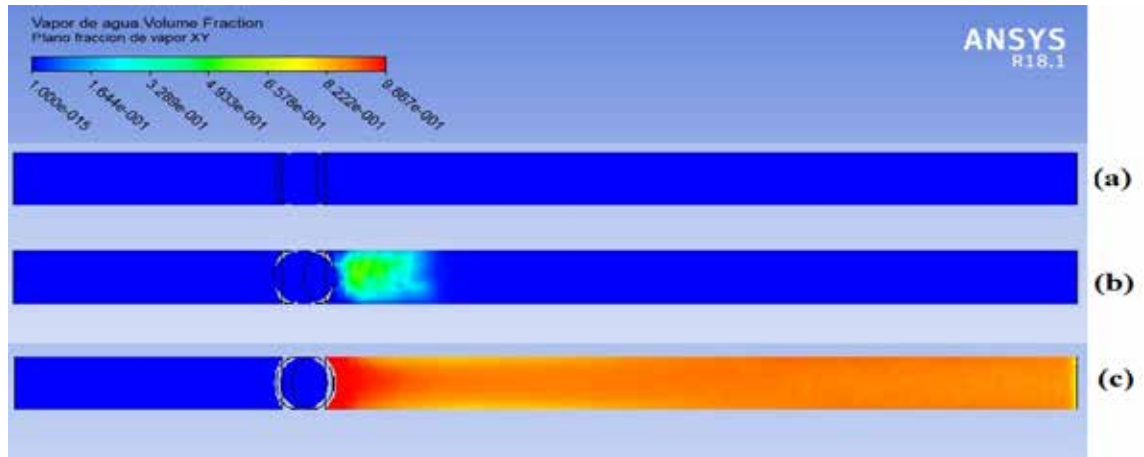


Figura 64. Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

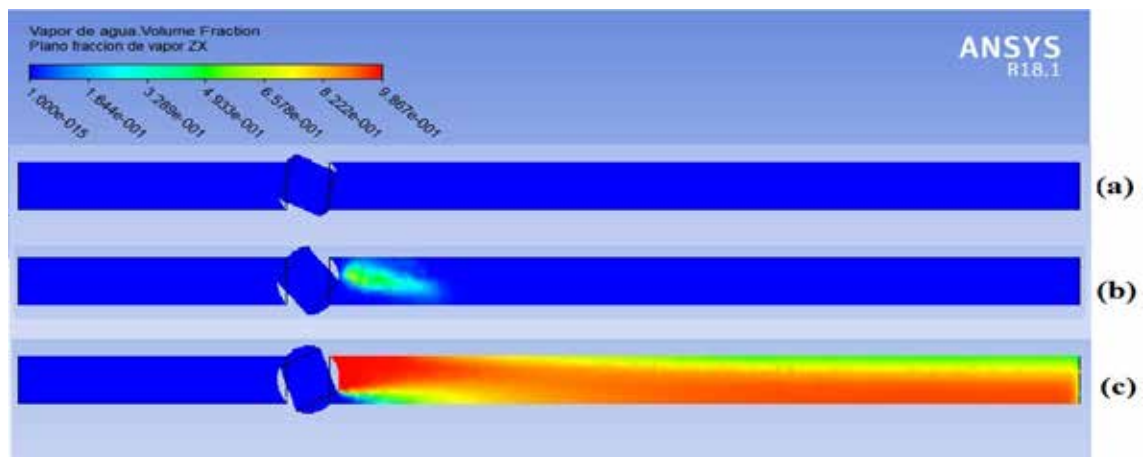
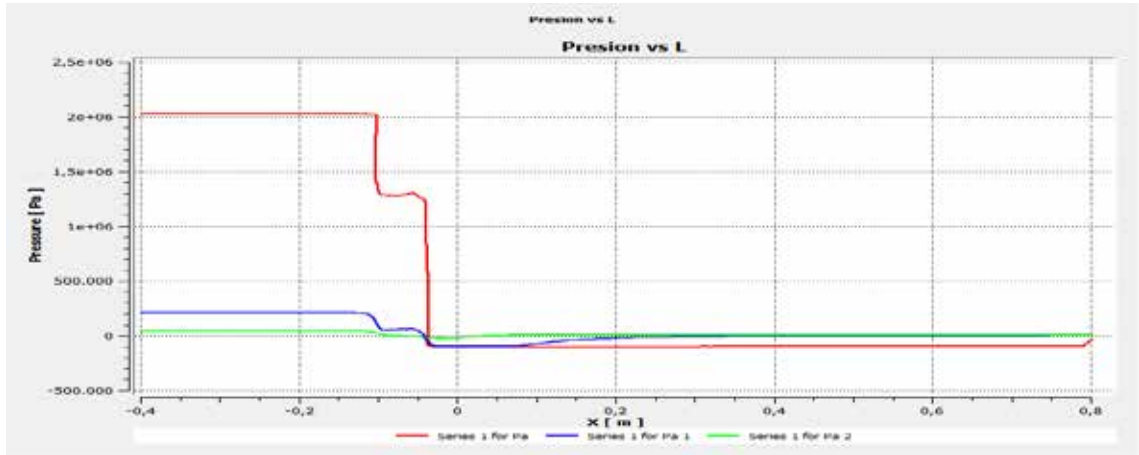


Figura 65. Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

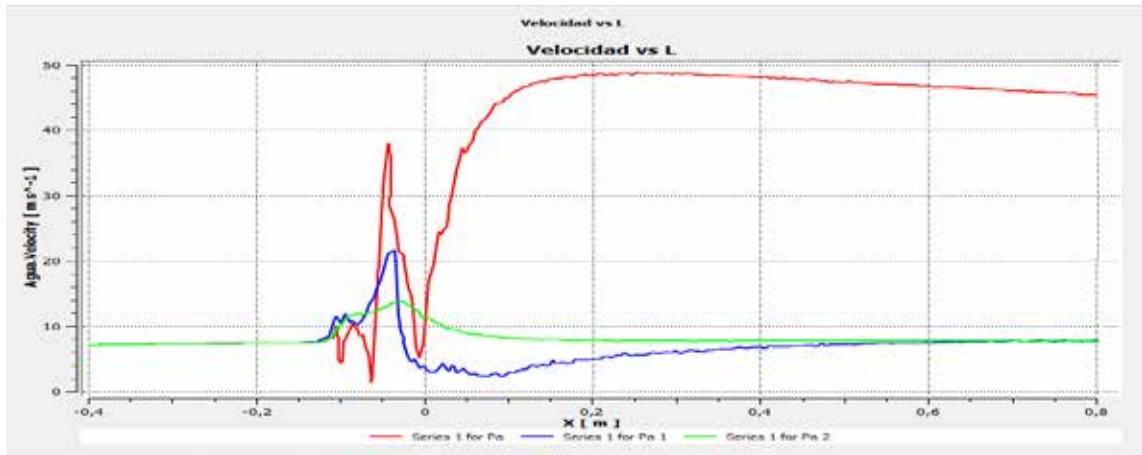
Gráfico Presión vs L



Gráfica 8. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

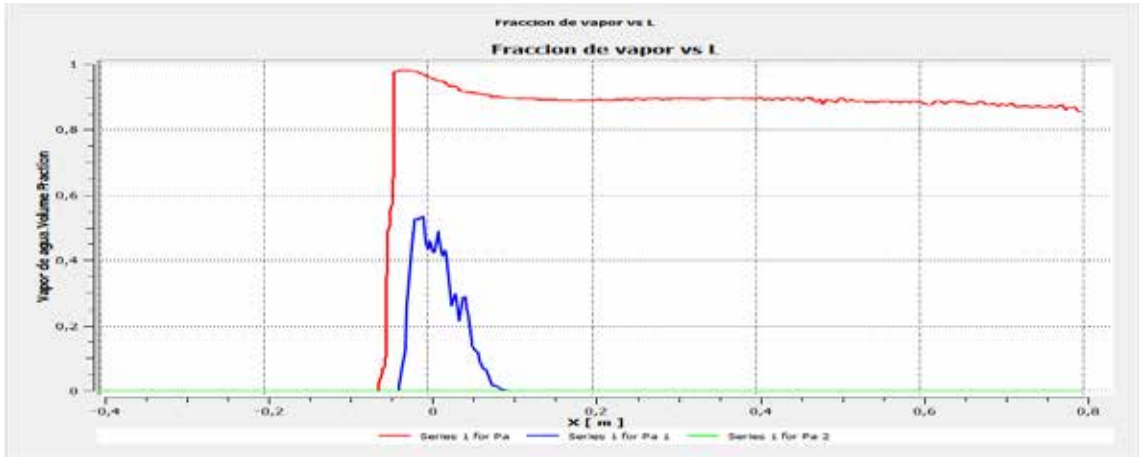
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 9. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 10. Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de Salida 3166Pa

Presión

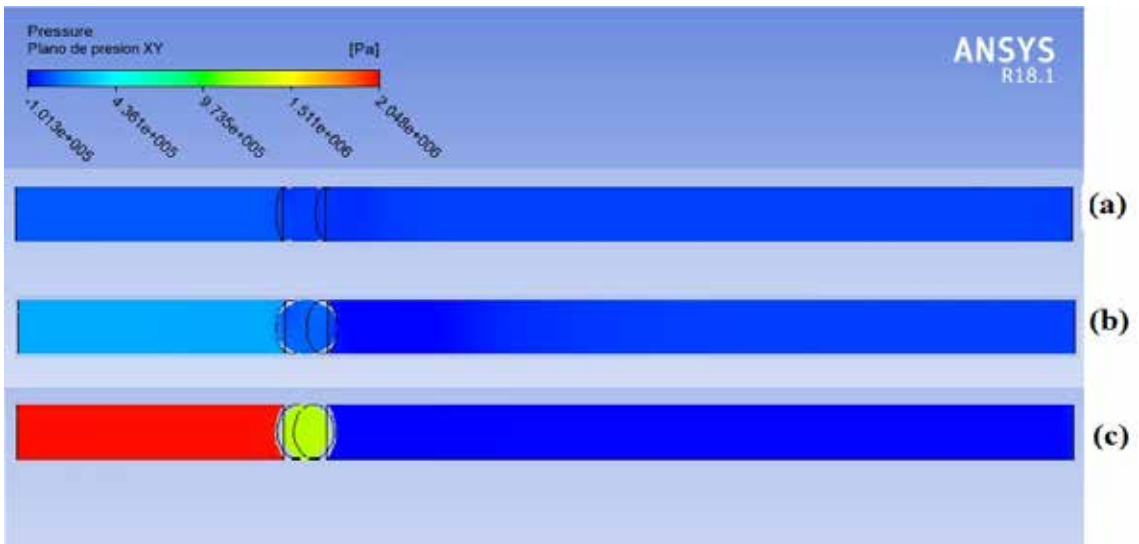


Figura 66. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

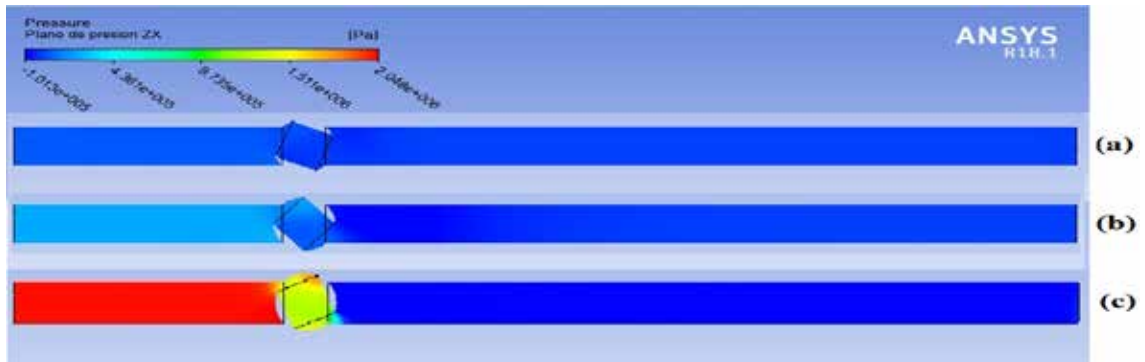


Figura 67. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

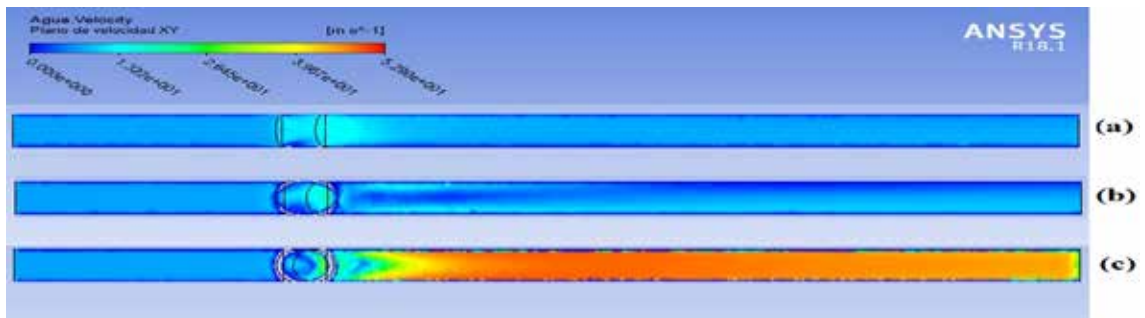


Figura 68. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

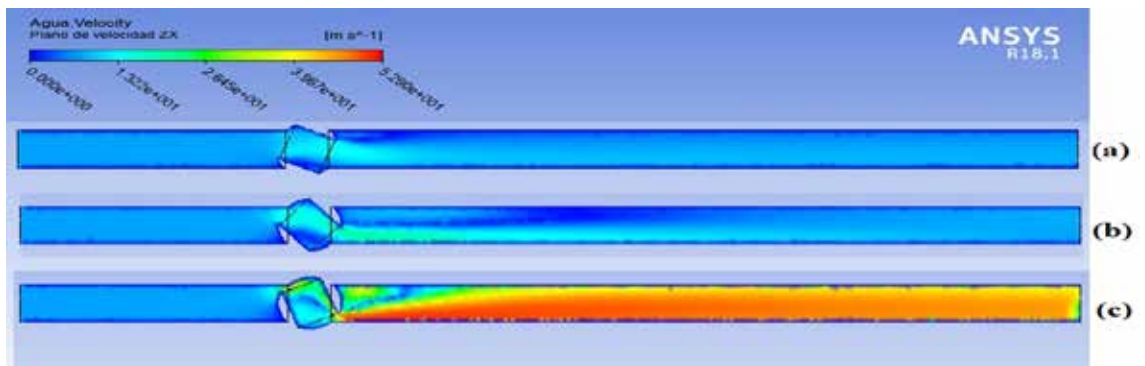


Figura 69. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

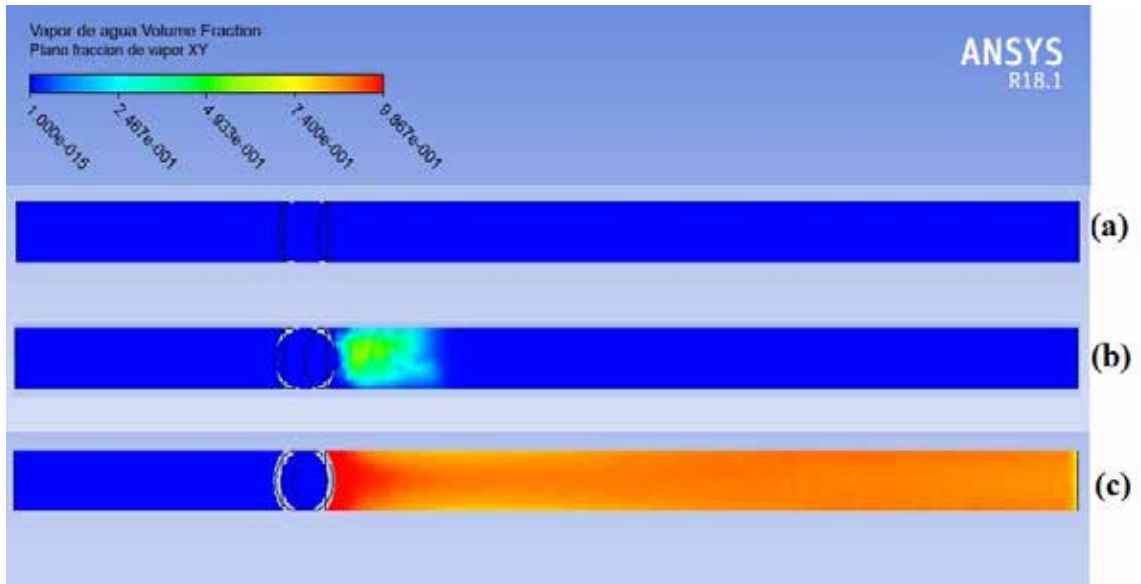


Figura 70. Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

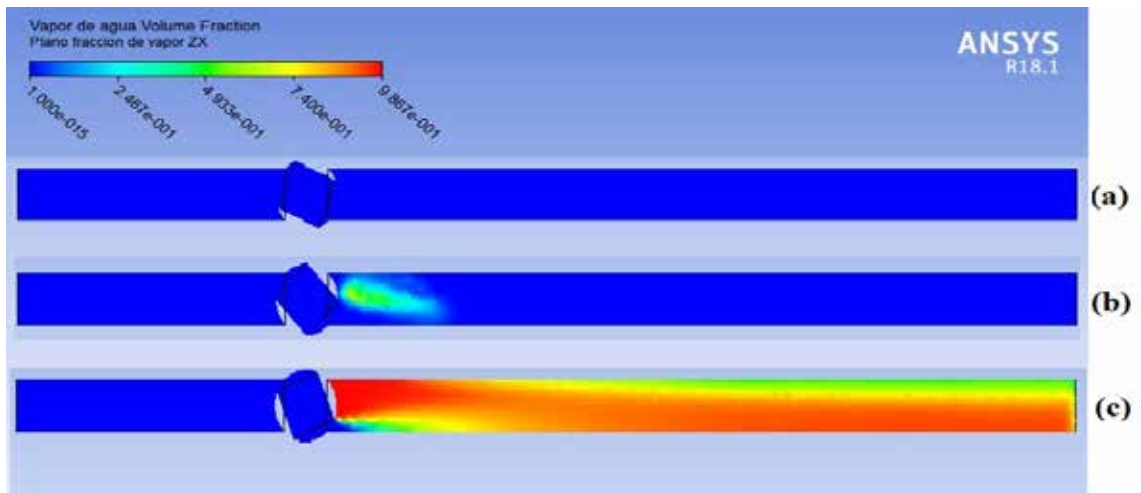
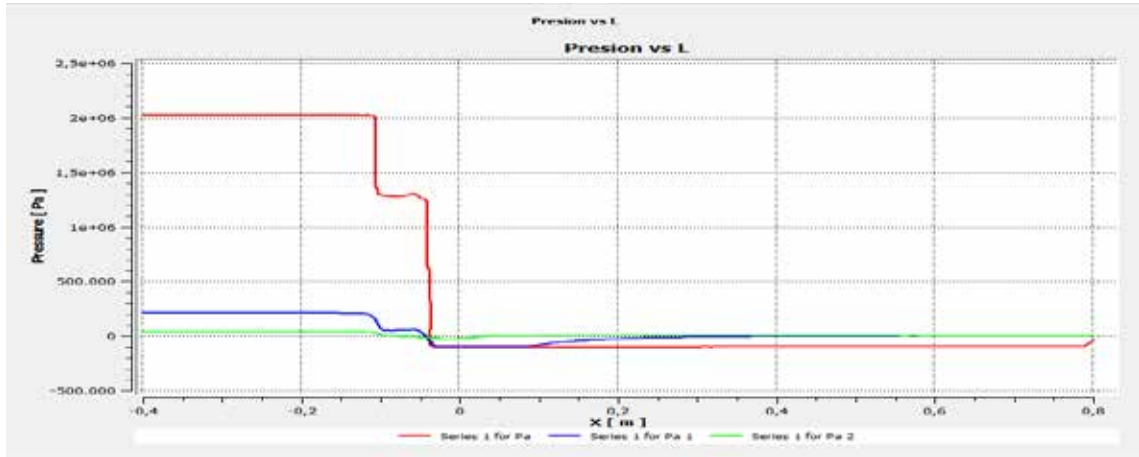


Figura 71. Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

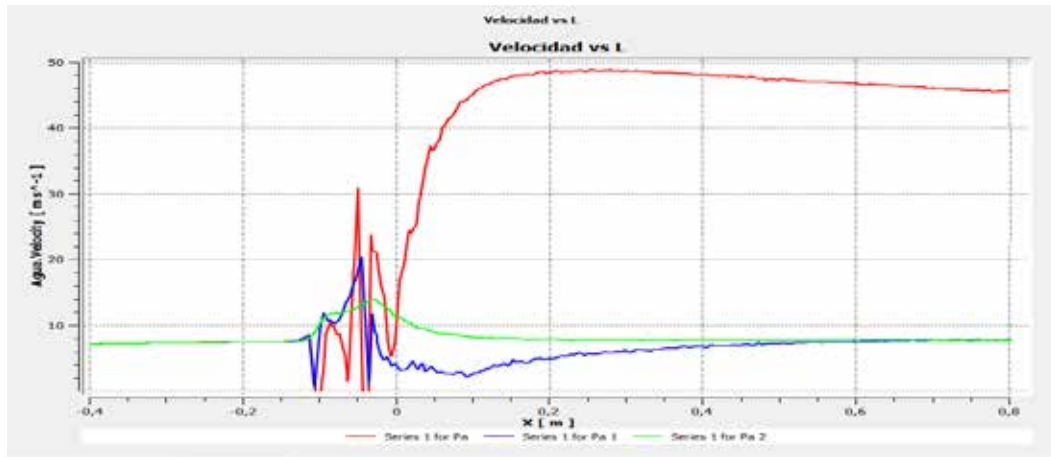
Gráfico Presión vs L



Gráfica 11. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

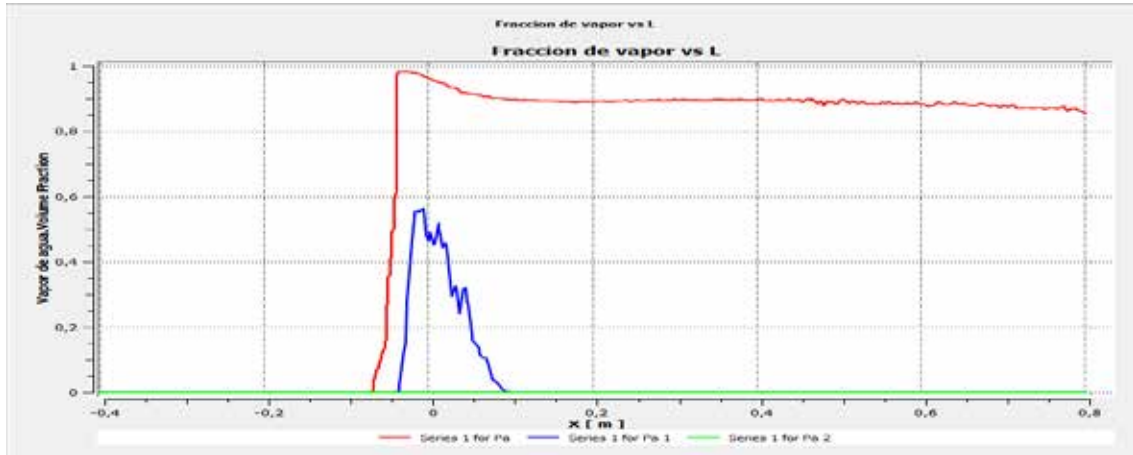
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 12. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 13. Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Al comparar el comportamiento de las variables analizadas en función del porcentaje de apertura de la válvula para la válvula de bola primeramente se observó que, para un mismo porcentaje de apertura, al variar la presión de salida se tienen cambios poco apreciables y se tiene un comportamiento bastante similar. Por otra parte, al comparar el comportamiento del flujo en función de las diferentes posiciones del obturador se evidencian cambios a gran escala para todas las variables que se analizaron.

En cuanto a la Presión, se tiene un aumento en el tramo aguas arriba del obturador y en el caso contrario del tramo aguas abajo se tiene una disminución considerable de la presión a medida que se obstruye o se estrangula más el paso del fluido. Por el contrario, mientras mayor es el área de flujo a través del obturador la diferencia de presión en el punto aguas arriba y aguas abajo es muy pequeña.

Por otro lado, al observar el comportamiento de la velocidad, inmediatamente se evidencia el aumento de ésta cuando el flujo se encuentra en cambios de dirección producto del ángulo del obturador. Al tener la válvula en 25% de apertura, se tiene un

aumento considerable en la velocidad debido a que se tiene un área de flujo muy pequeña, siendo el mismo punto donde se tiene gran caída de presión, que no es más que la disminución de energía potencial elástica a expensas de la presión y el aumento de energía cinética según se define en la ley de conservación de energía.

Además de ello, se observa que mientras más se estrangula el flujo, se necesita mayor distancia desde el obturador para que la velocidad del flujo se establezca nuevamente, para 25% de apertura es de notar que para alcanzar una velocidad más estable haría falta una distancia un poco mayor a 20D.

Finalmente, se tiene el aumento gradual de Cavitación a lo largo de la trayectoria del flujo. Este aumento se da en las zonas donde se tiene ese cambio de energía cinética y potencial, lo cual como ya se explicó se da en el menor porcentaje de apertura de la válvula. En las figuras se observan zonas donde el fluido es casi 100% vapor de agua.

Para una mejor visualización de los resultados se emplearon los gráficos P vs L, V vs L y Fracción de Vapor vs L, en ellos se muestra la magnitud de la variación del comportamiento de las variables en estudio.

Comportamiento de líneas de Flujo

A continuación, se presenta el comportamiento de las líneas de flujo a través de la válvula de bola (Ver figuras 72 a la 74).

Apertura 25%

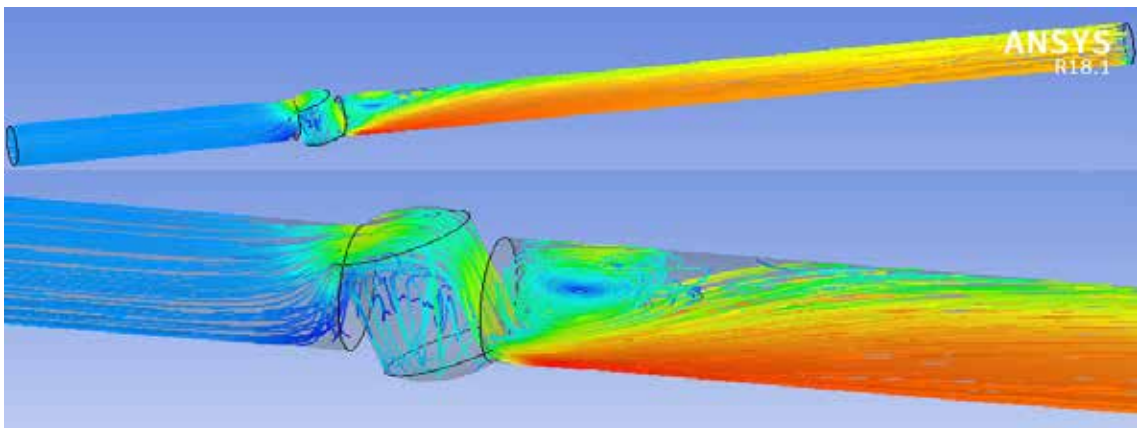


Figura 72. Líneas de flujo para válvula de bola con 25% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

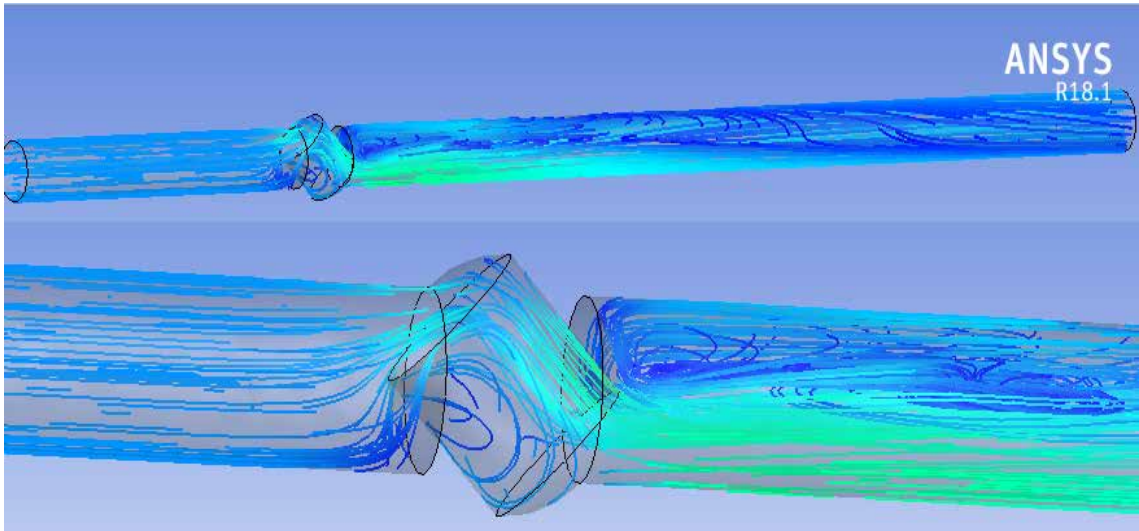


Figura 73. Líneas de flujo para válvula de bola con 50% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%

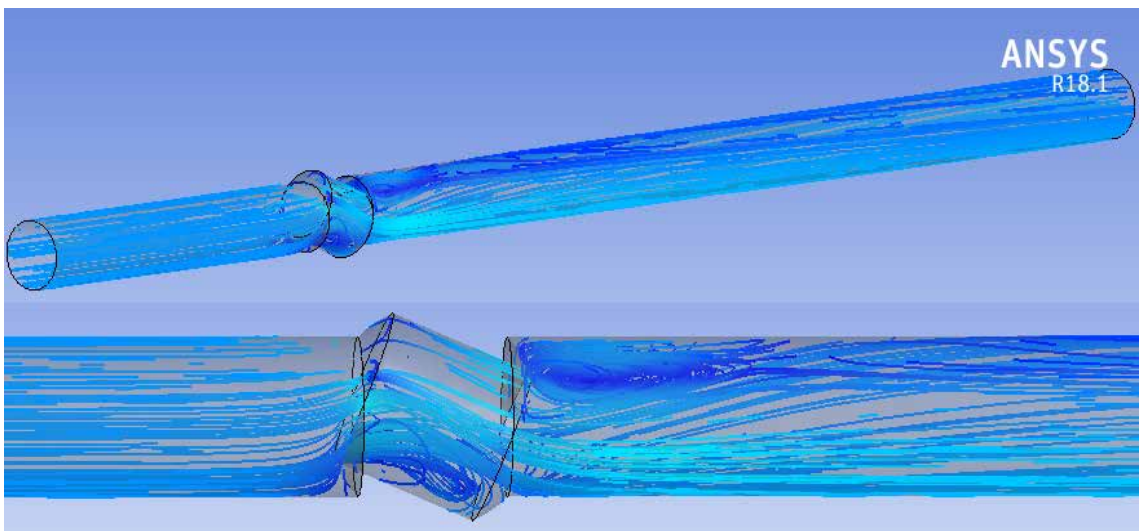


Figura 74. Líneas de flujo para válvula de bola con 75% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Al observar las figuras 72 a la 74 se puede apreciar la trayectoria de las partículas del fluido, las zonas donde se produce mayor turbulencia evidentemente es en el paso a través del obturador y justo en la entrada y salida de éste. Es de notar el incremento de “torbellinos” o vórtices a medida que se obstruye el paso del flujo.

4.4.2.2. Dominio Fluidizado de Válvula de Compuerta

En este apartado se muestra el comportamiento de la Presión, Velocidad y Cavitación para el flujo a través de la válvula de compuerta. La información se presenta en la misma secuencia utilizada para presentar los resultados de la válvula de bola.

Comparación de resultados en función del porcentaje de apertura

Presión de Salida 6332Pa

Presión



Figura 75. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

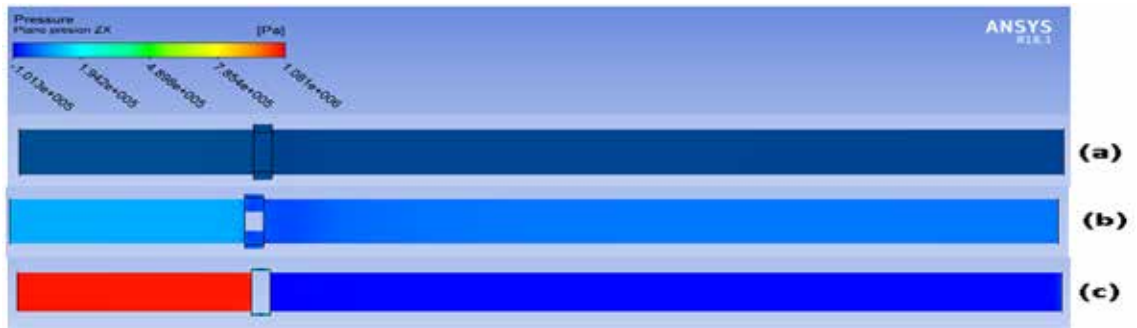


Figura 76. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

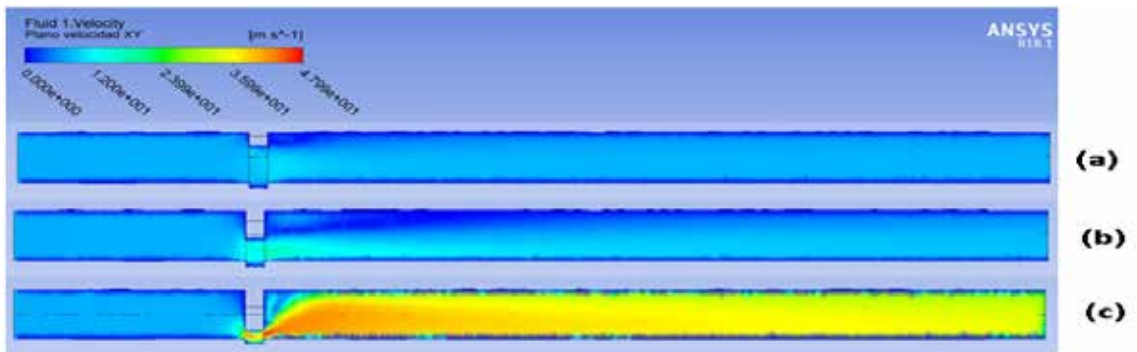


Figura 77. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

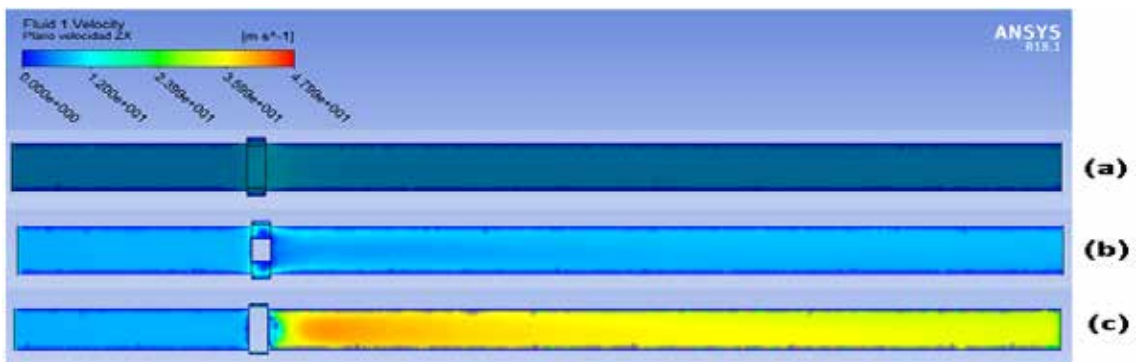


Figura 78. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

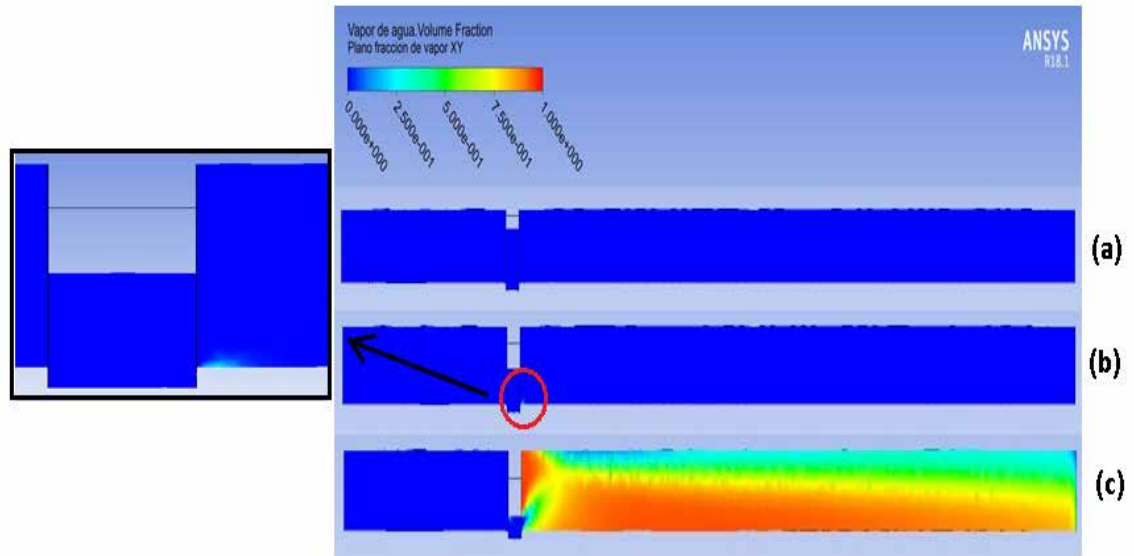


Figura 79. Fracción de Vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

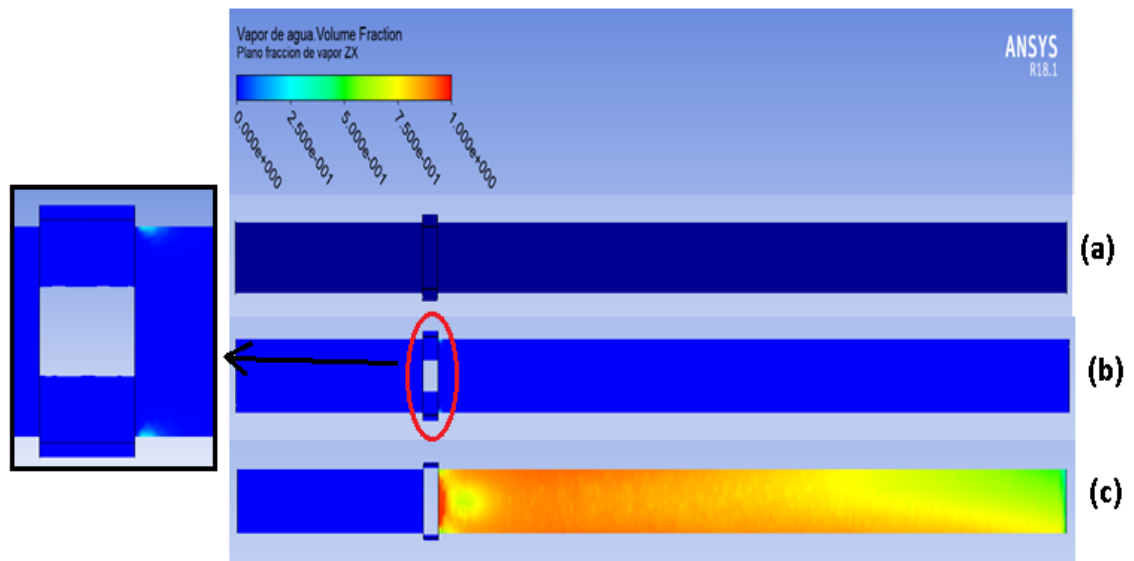
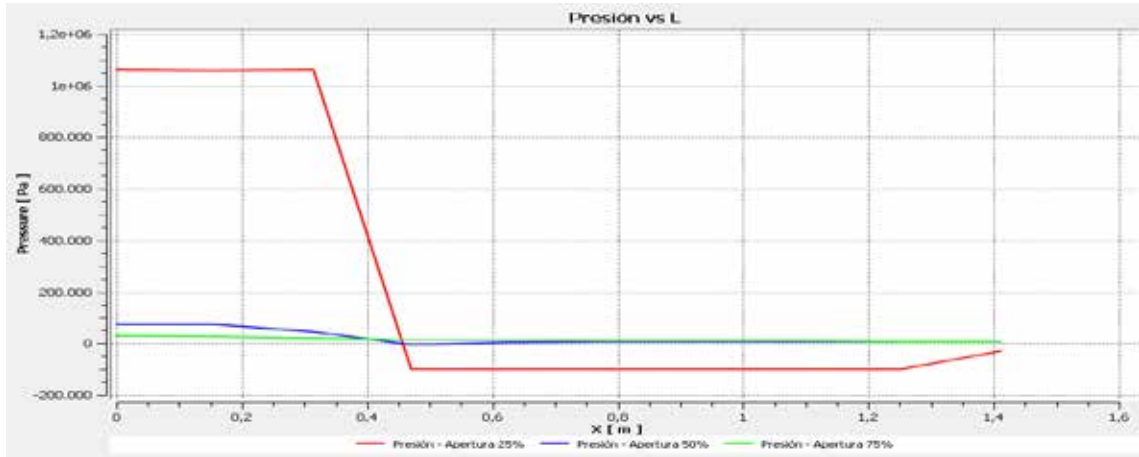


Figura 80. Fracción de Vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

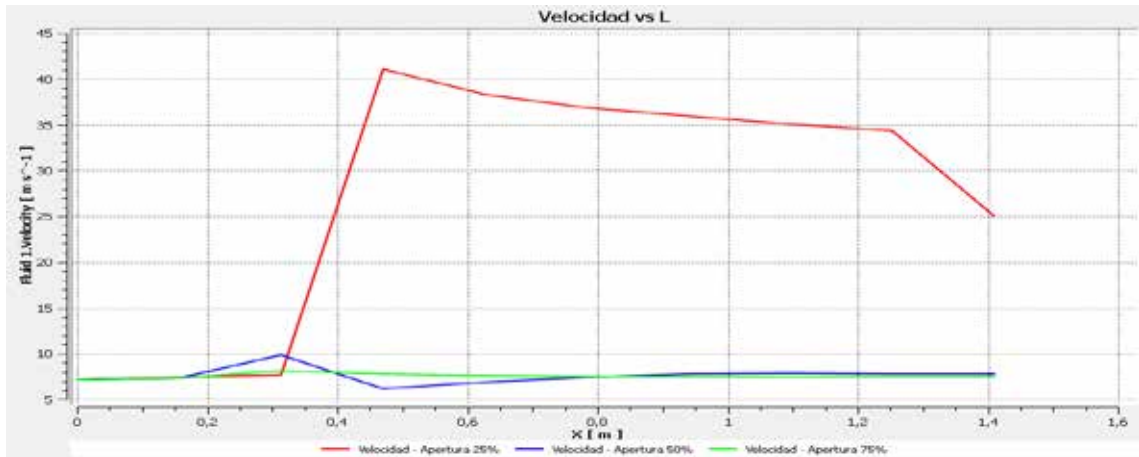
Gráfico Presión vs L



Gráfica 14. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

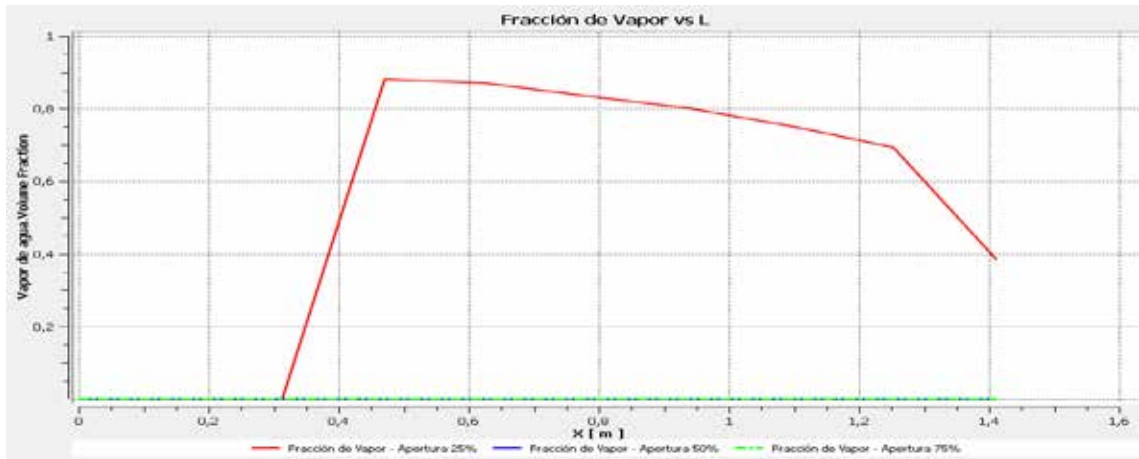
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 15. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 16. Fracción de Vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25% (Rojo), 50% (Azul) y 75% (verde).

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de Salida 4749Pa

Presión

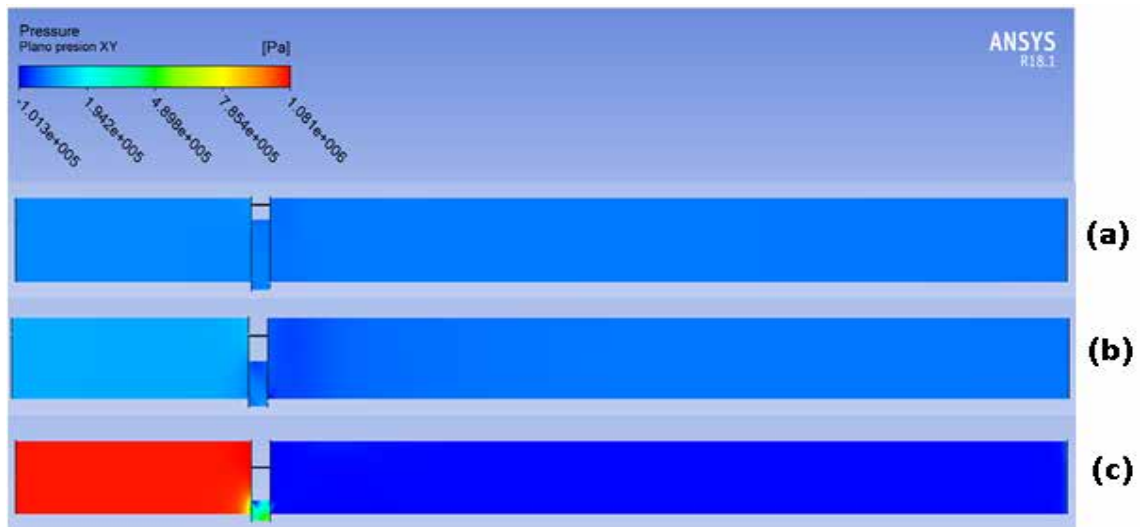


Figura 81. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 82. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

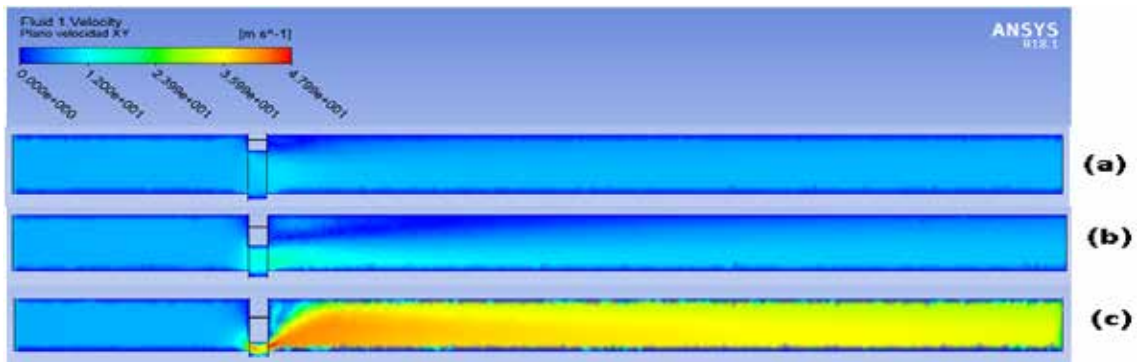


Figura 83. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

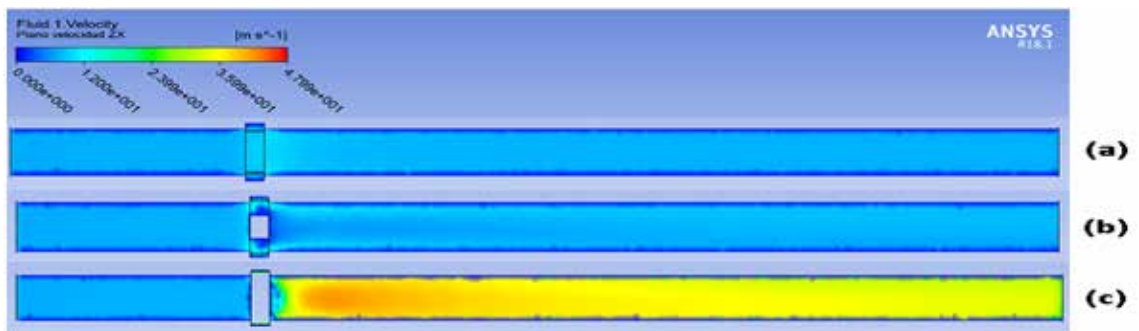


Figura 84. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

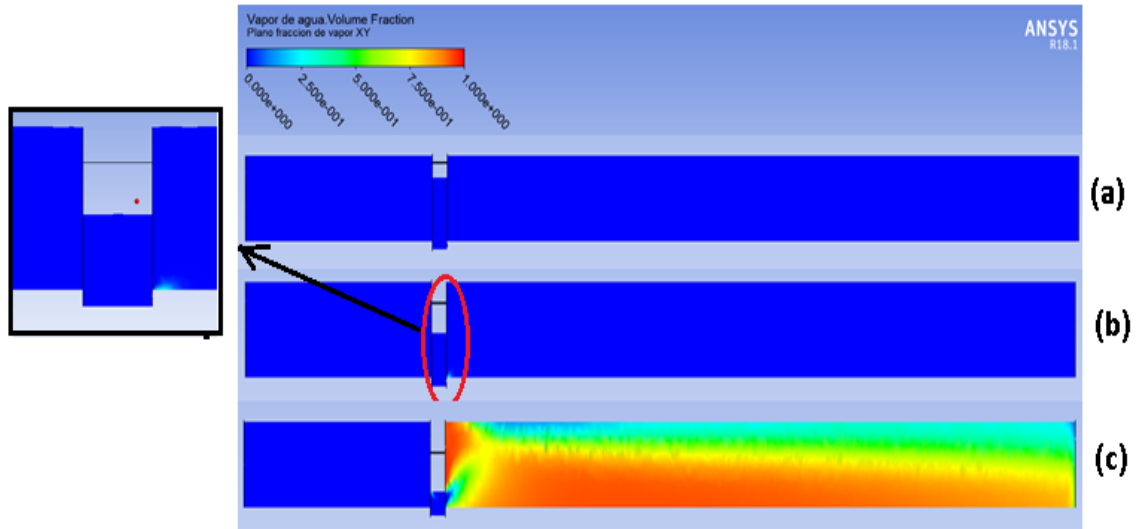


Figura 85. Fracción de Vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

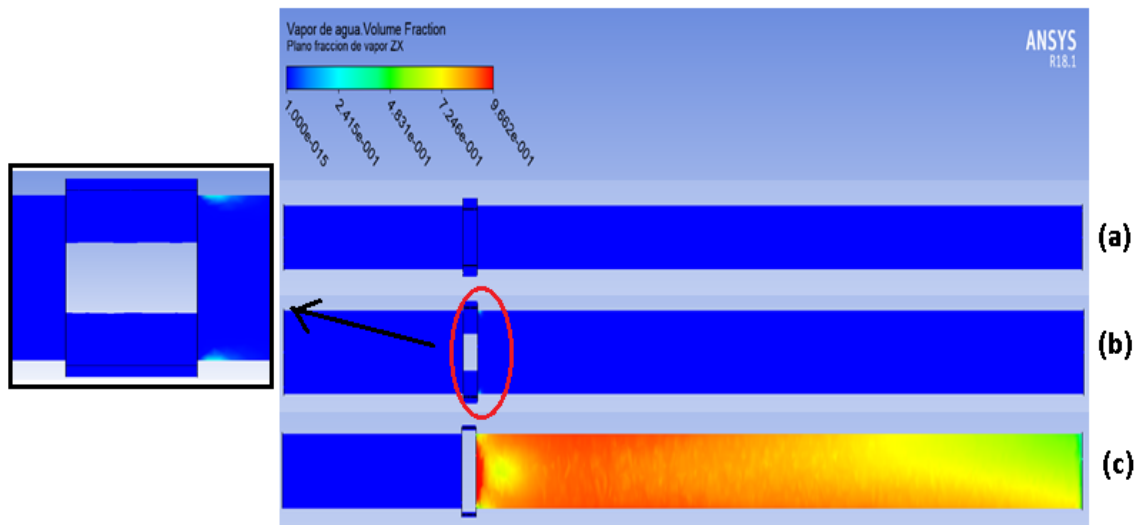
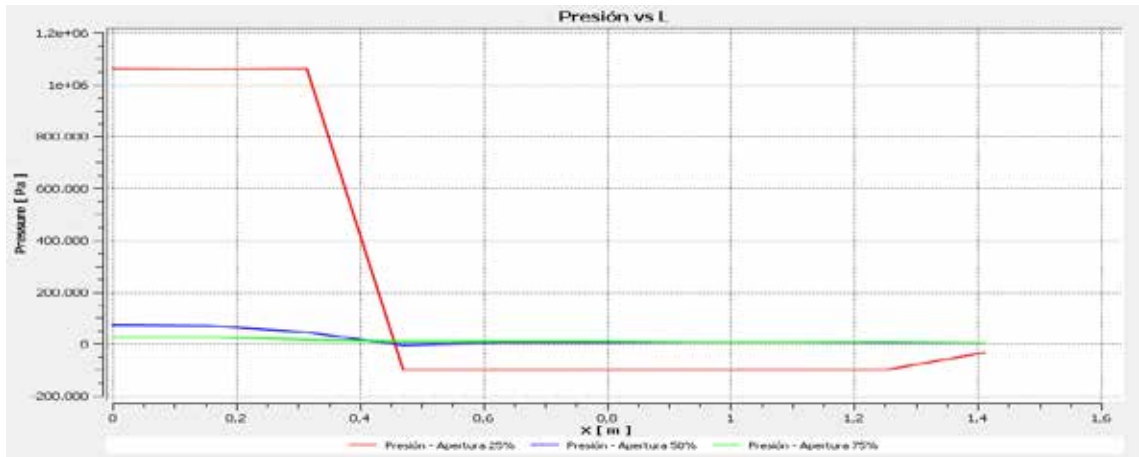


Figura 86. Fracción de Vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

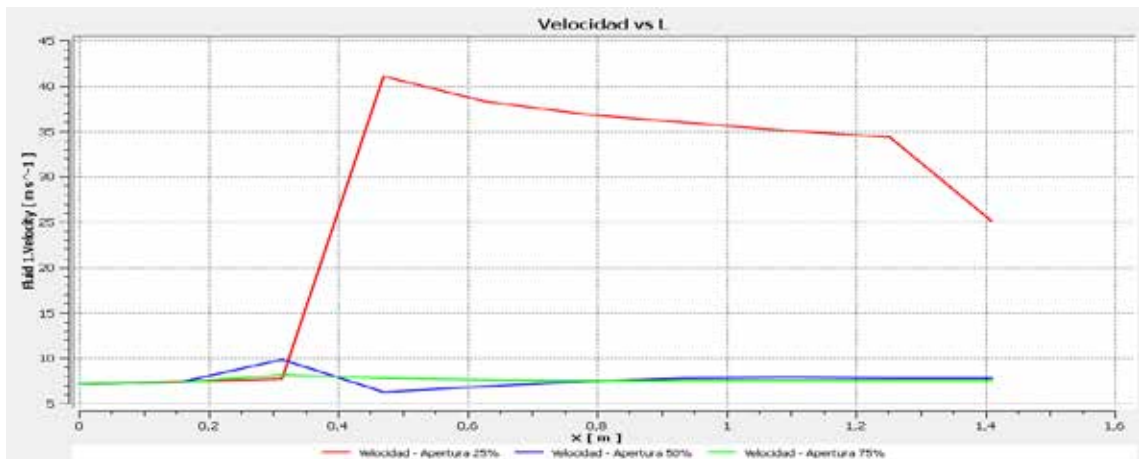
Gráfico Presión vs L



Gráfica 17. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 18. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 19. Fracción de Vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de Salida 3166Pa

Presión



Figura 87. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

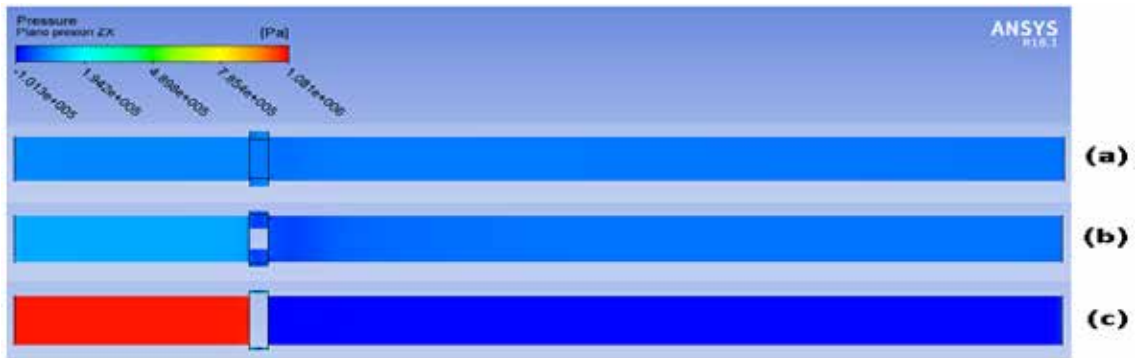


Figura 88. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

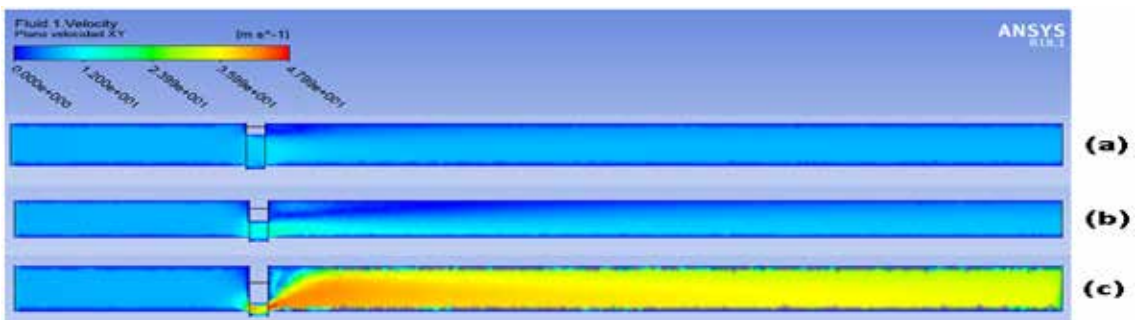


Figura 89. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

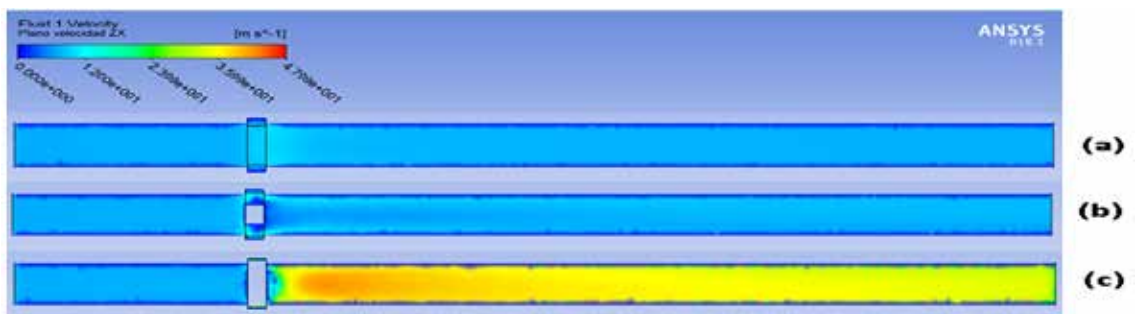


Figura 90. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

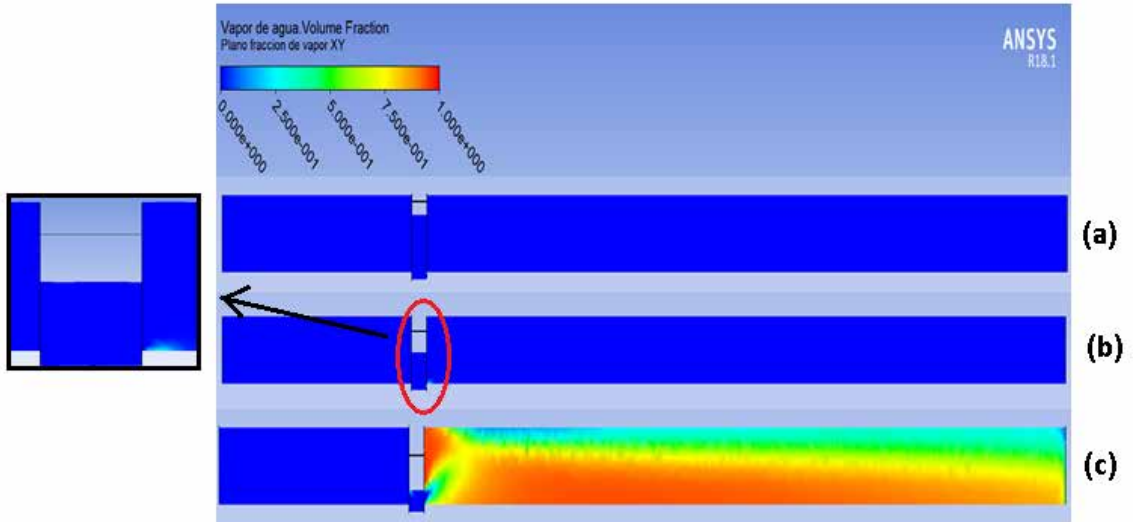


Figura 91. Fracción de Vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

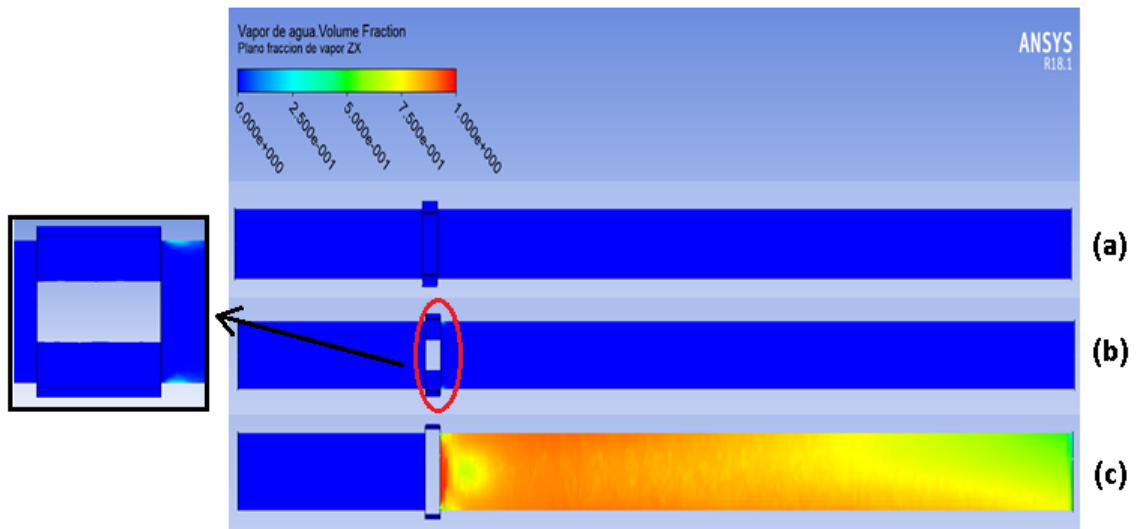
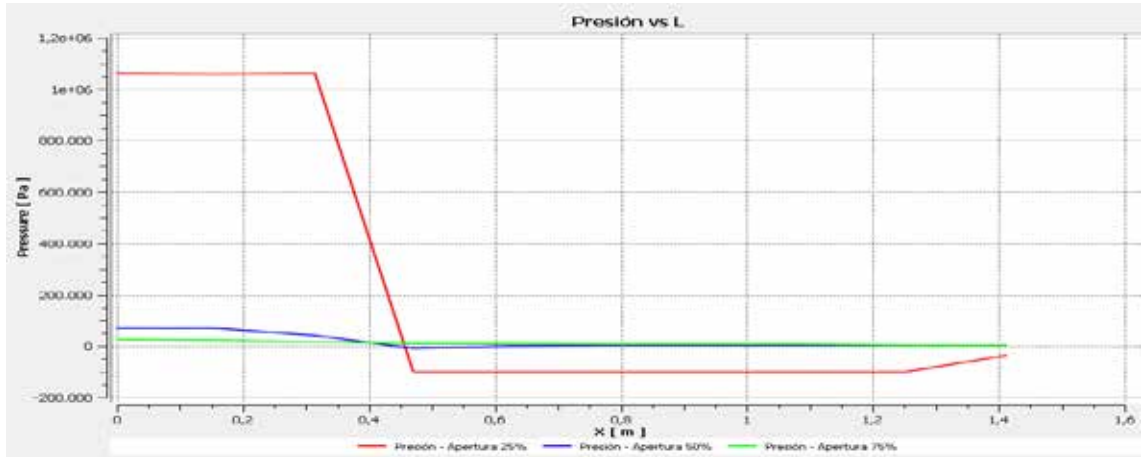


Figura 92. Fracción de Vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

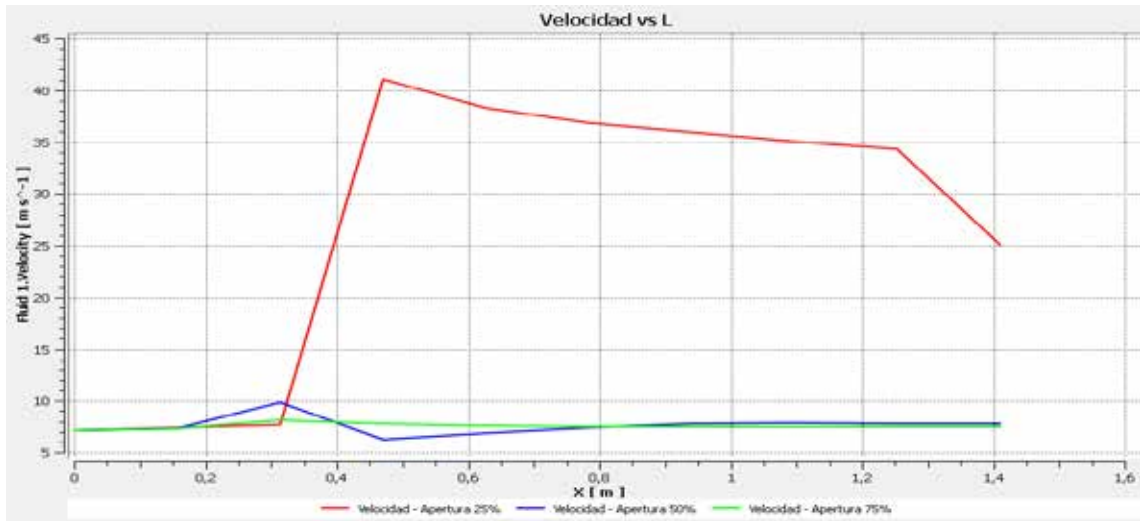
Gráfico Presión vs L



Gráfica 20. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 21. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 22. Fracción de Vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25% (Rojo), 50% (Azul) y 75% (verde).

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Una vez presentados los resultados correspondientes al dominio fluidizado de la válvula de compuerta, se generaron situaciones similares a las presentadas en la válvula de bola. El comportamiento de las variables analizadas tiene poca variación cuando se varía la presión en el punto aguas debajo de la trayectoria del fluido, pero al variar la posición del obturador, el flujo experimenta grandes cambios.

En lo que respecta a la presión, igualmente se tiene mayor diferencia entre el punto aguas arriba y aguas abajo conforme se disminuye el área de flujo a través del obturador. Se observó que justo cuando el fluido se encuentra con el obturador se genera un aumento de presión en la parte superior del conducto y una gran disminución en la mitad inferior que es donde el fluido entra en la zona donde atraviesa el obturador. Y en la salida es todo lo contrario, en la parte superior se tiene menos presión que en la parte inferior del flujo.

Seguidamente, al observar el comportamiento de la velocidad, se produce un aumento conforme se varía la posición del obturador. Al igual que en la válvula de bola, en aquellas zonas donde la presión cae es donde la velocidad aumenta, siendo

esta situación más crítica con 25% de apertura. Pero, al observar detalladamente, se puede notar que en el flujo a través de la válvula de compuerta se necesita menor distancia desde el obturador para estabilizar la velocidad en comparación con la necesaria en la válvula de bola.

Por último, se tiene la formación de Cavitación, el vapor aumenta su volumen en aquellas zonas donde la presión cae considerablemente y la velocidad del flujo se eleva. Para un porcentaje de apertura de 50% es casi inapreciable el vapor que se genera, pero con 25% de apertura se observan zonas donde el fluido es casi 100% vapor de agua.

Para una mejor visualización de los resultados se emplearon los gráficos P vs L, V vs L y Fracción de Vapor vs L, en ellos se muestra la magnitud de la variación del comportamiento de las variables en estudio.

Comportamiento de líneas de Flujo

Apertura 25%

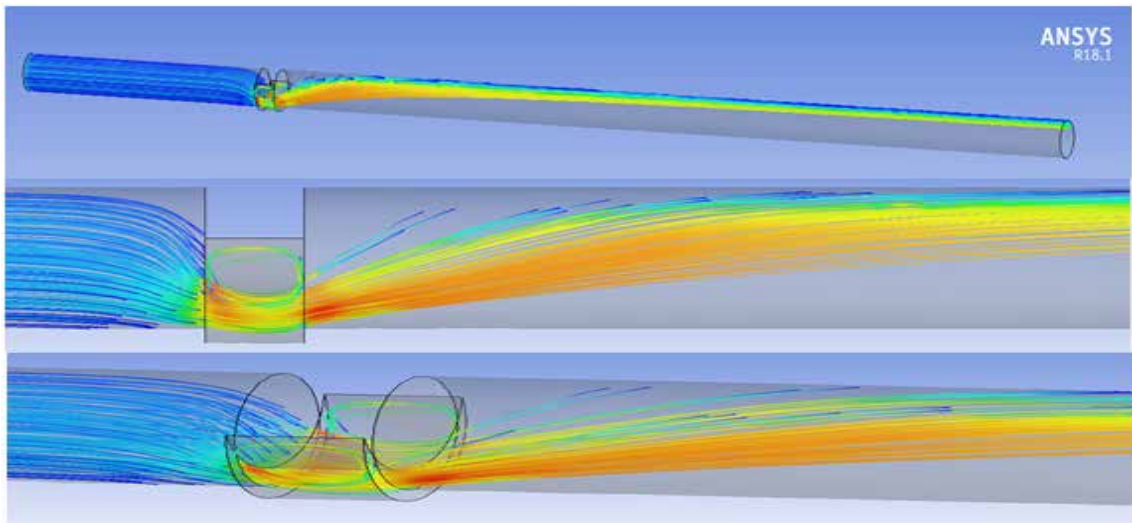


Figura 93. Líneas de flujo para válvula de compuerta con 25% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

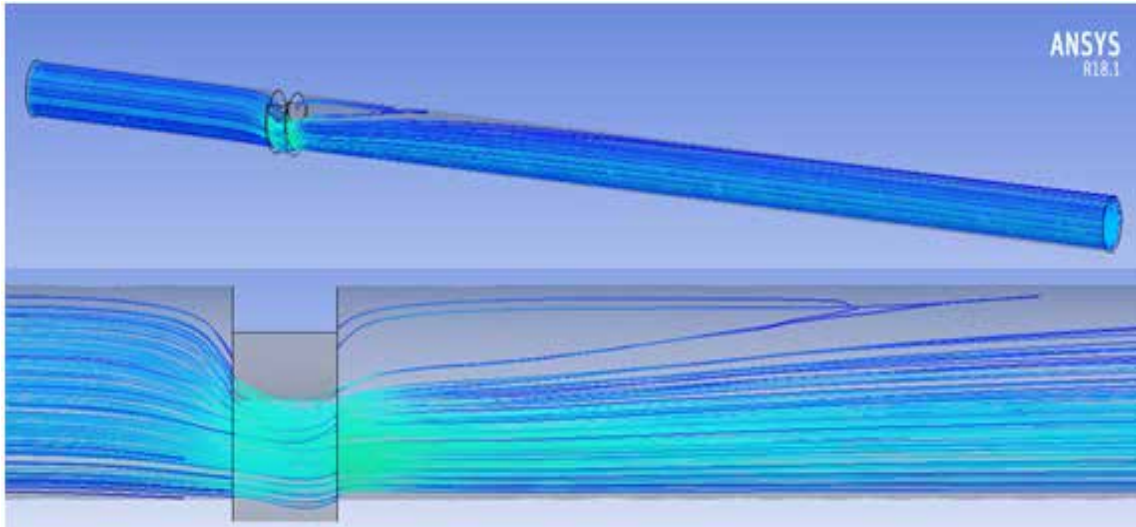


Figura 94. Líneas de flujo para válvula de compuerta con 50% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%

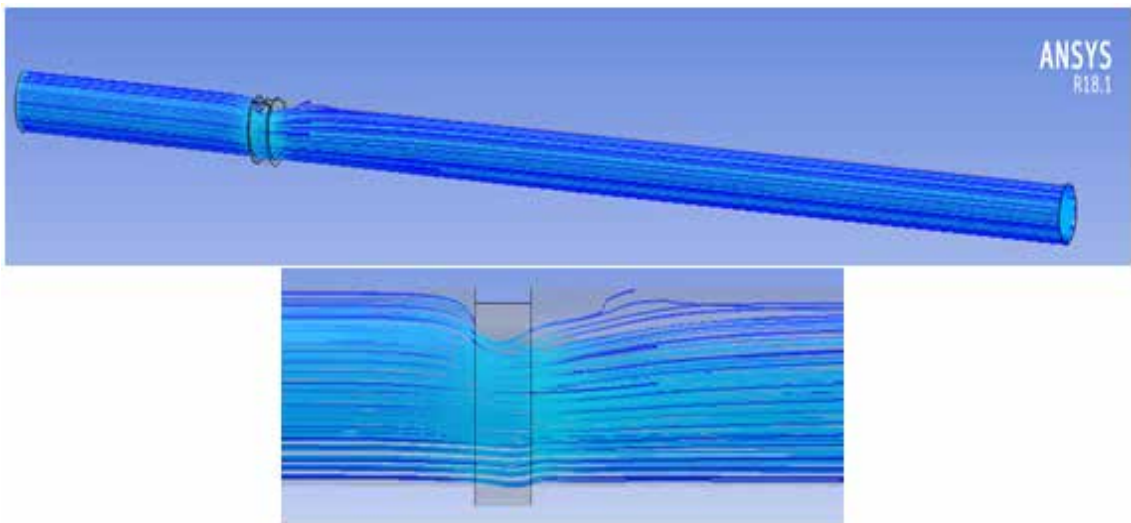


Figura 95. Líneas de flujo para válvula de compuerta con 75% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

En las figuras 93 a la 95 se puede apreciar el comportamiento de las líneas de flujo a través de la válvula de compuerta, a 75% de apertura se puede observar que la perturbación sobre el flujo es muy baja, pero se incrementa a medida que se disminuye ese porcentaje, lo que trae consigo el aumento de la turbulencia y la formación de vórtices en la cámara de la válvula.

4.4.2.3. Dominio Fluidizado de Válvula de Asiento Cónico

Finalmente se muestran los resultados de la simulación correspondiente al campo de flujo a través de la válvula de asiento cónico, resultando éste el campo más complicado en relación a los de la válvula de bola y compuerta. De igual manera, se mantiene el mismo orden en el cual se presentan los resultados.

Comparación de resultados en función del porcentaje de apertura

Presión de Salida 6332Pa

Presión

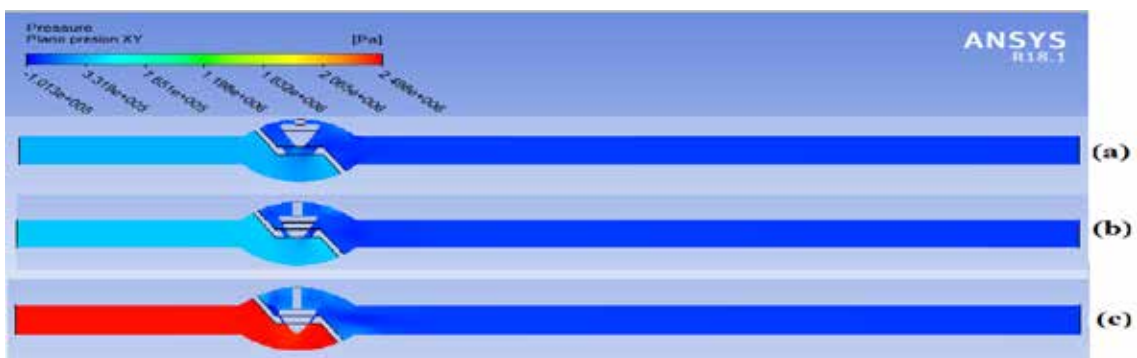


Figura 96. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 97. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

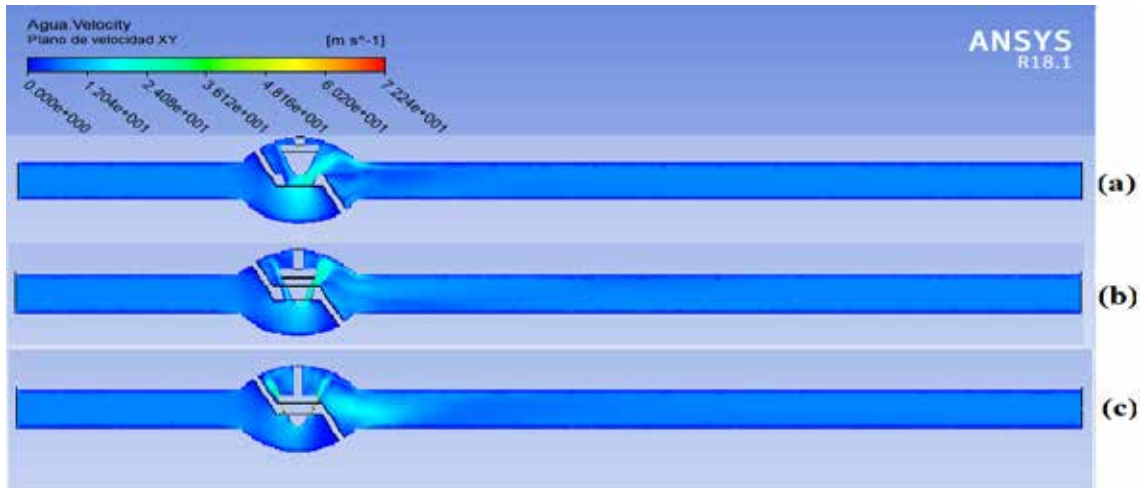


Figura 98. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

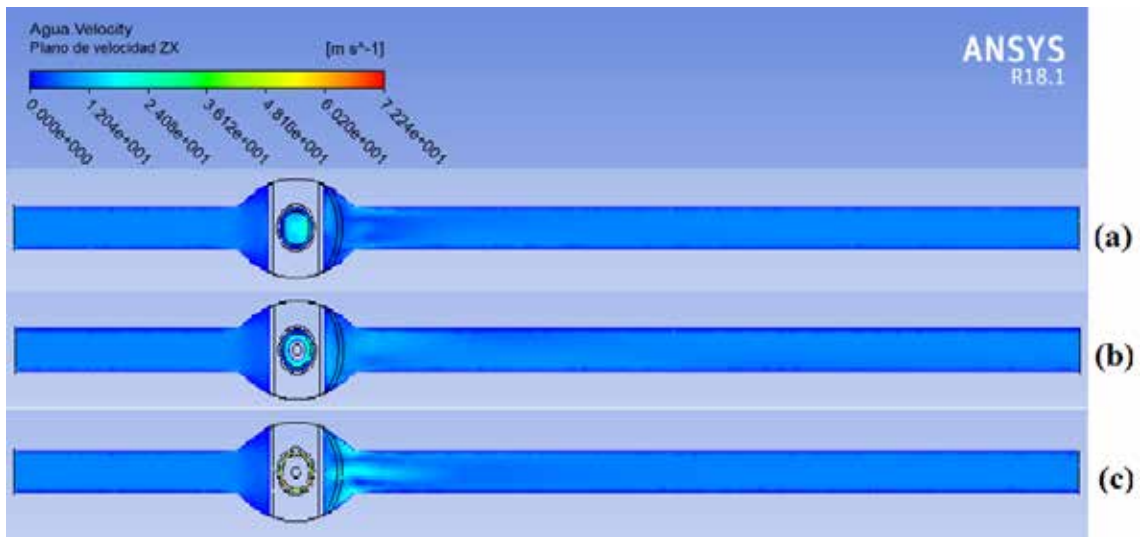


Figura 99. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

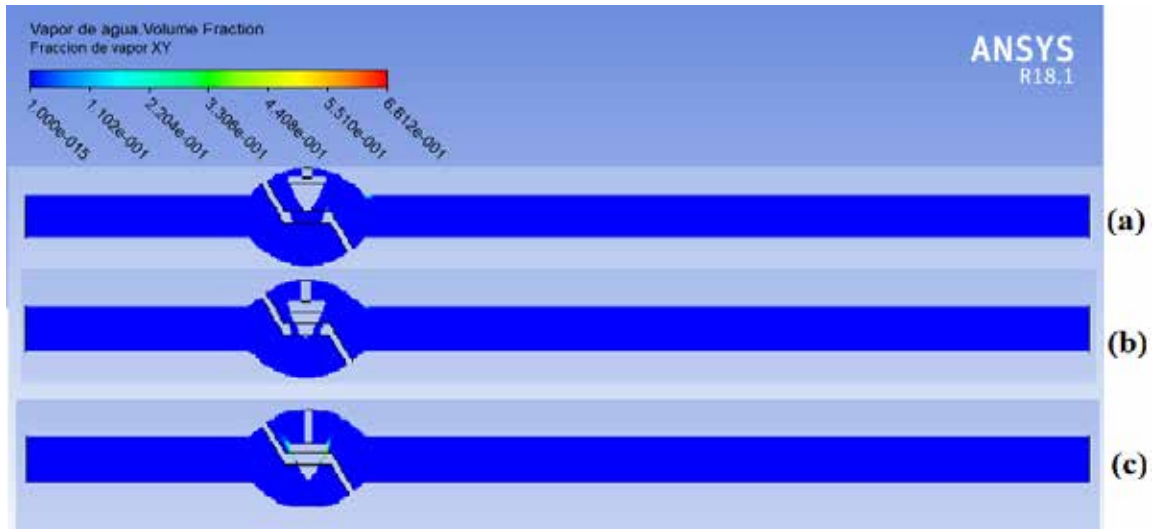


Figura 100. Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

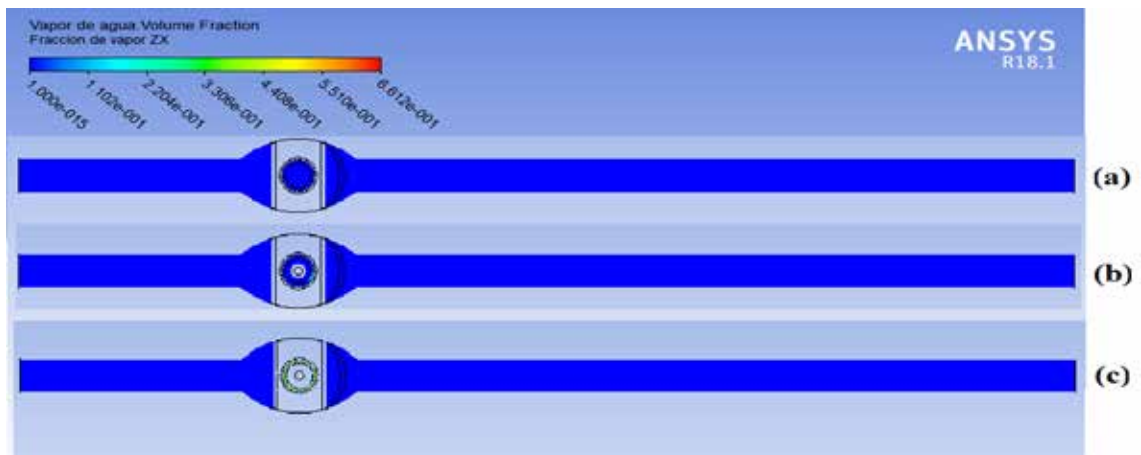
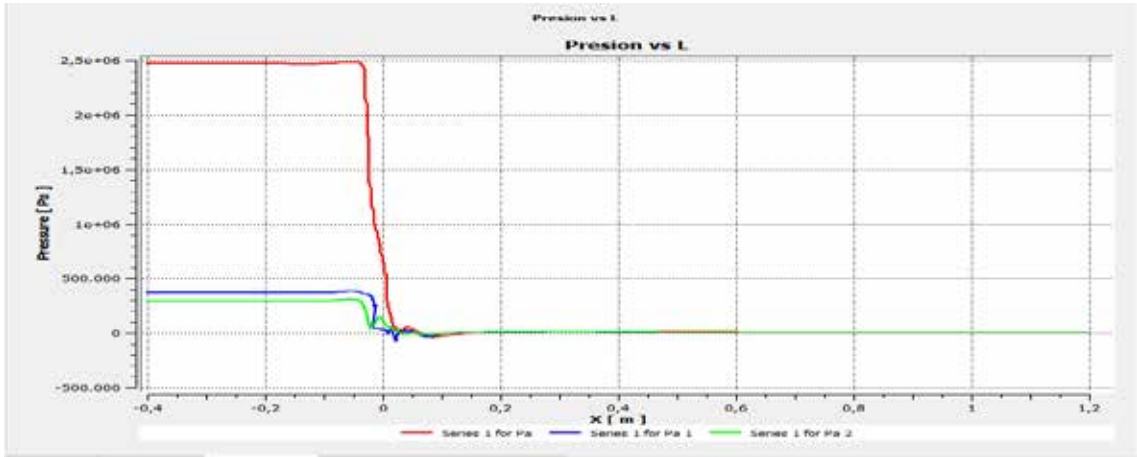


Figura 101. Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

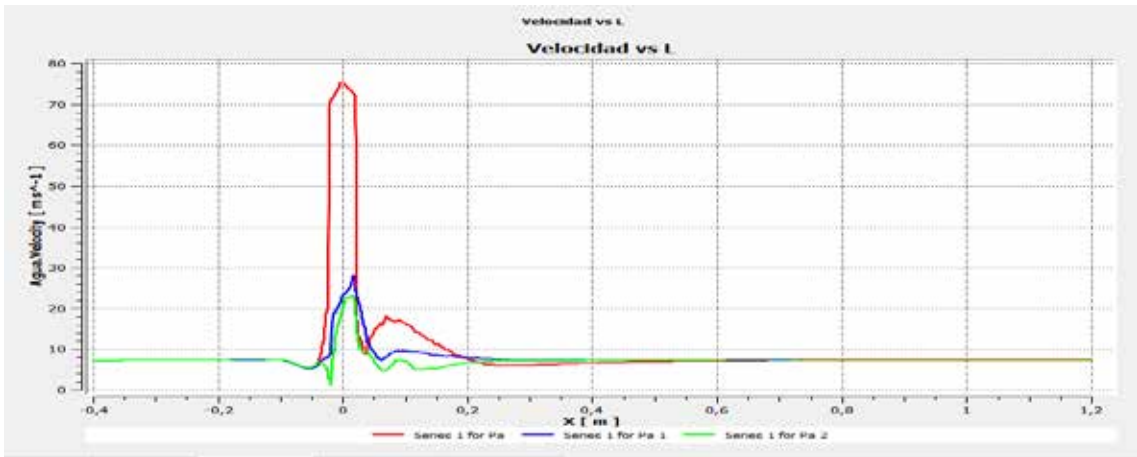
Gráfico Presión vs L



Gráfica 23. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

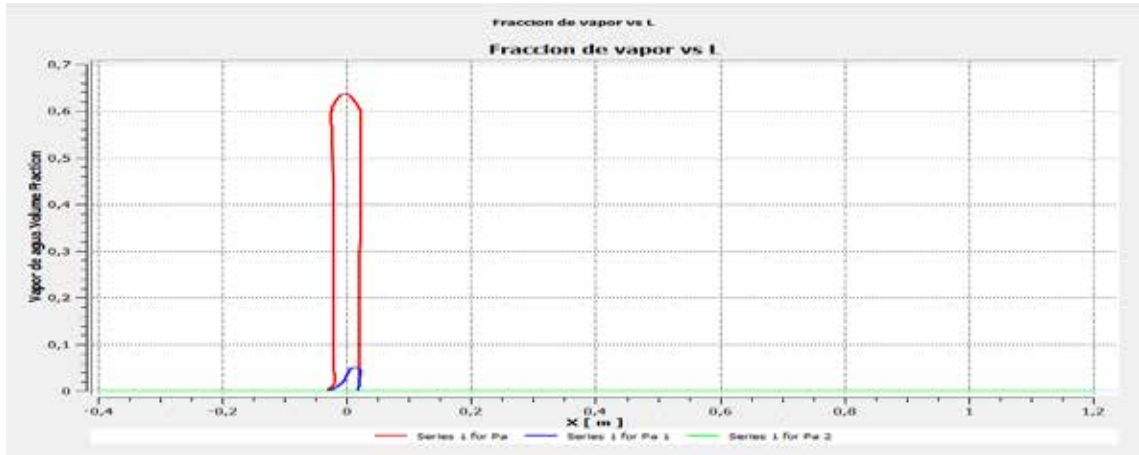
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 24. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 25. Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de Salida 4749Pa

Presión

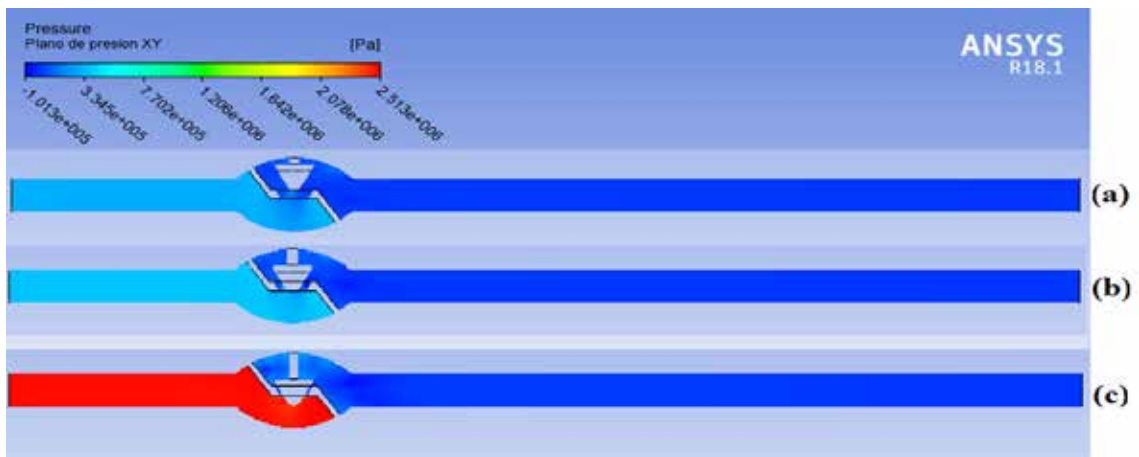


Figura 102. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 103. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

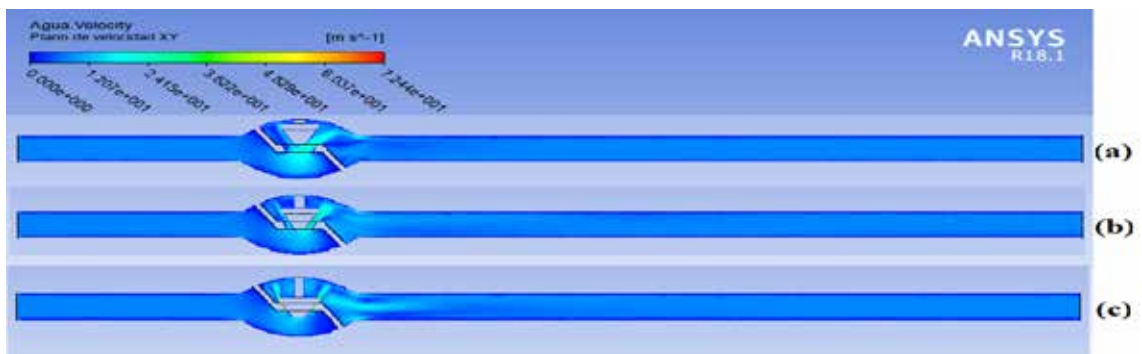


Figura 104. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 105. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

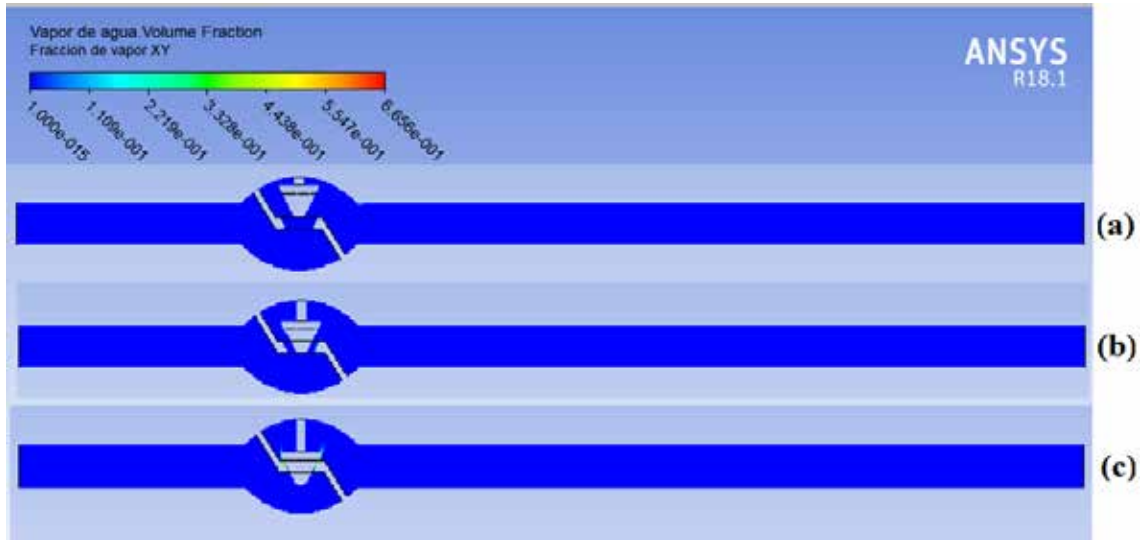


Figura 106. Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

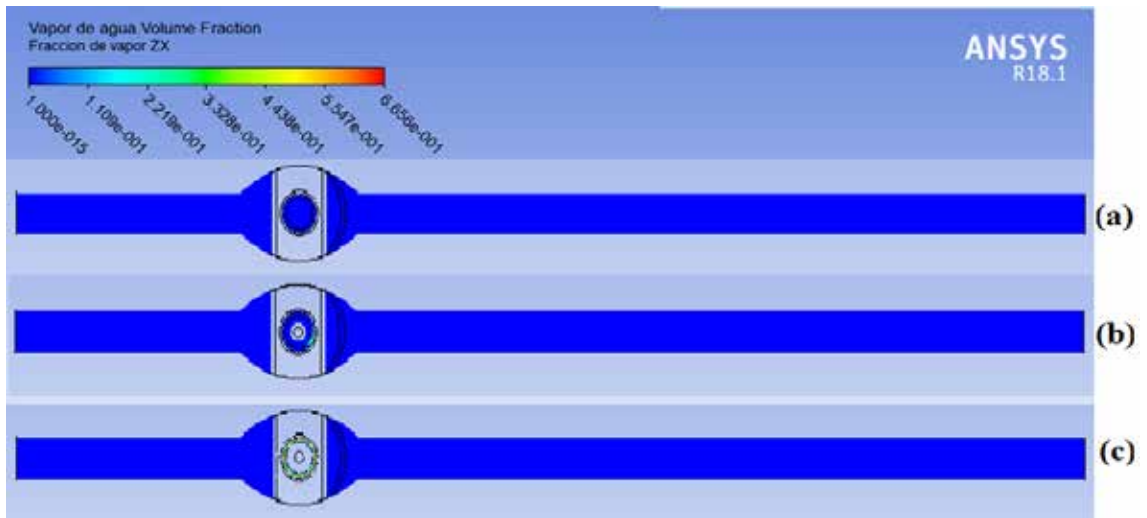
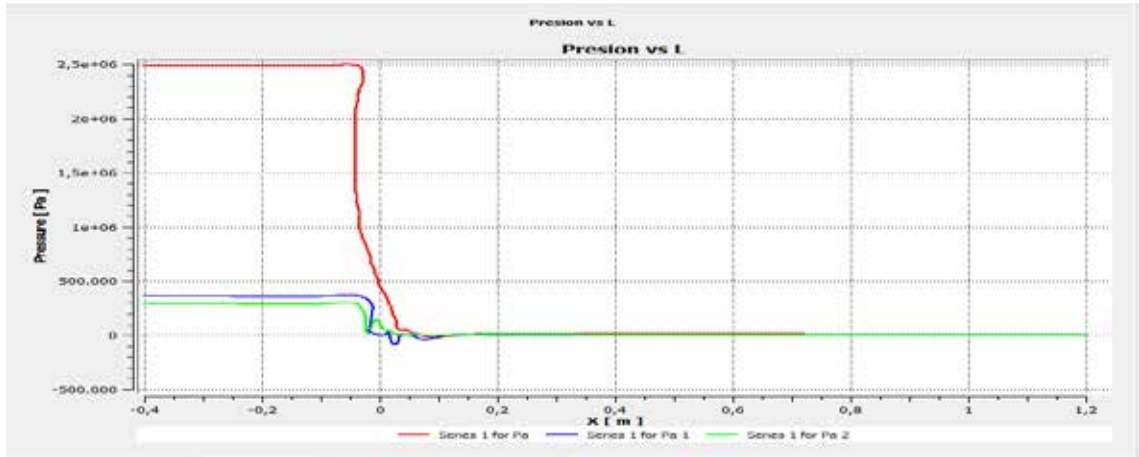


Figura 107. Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

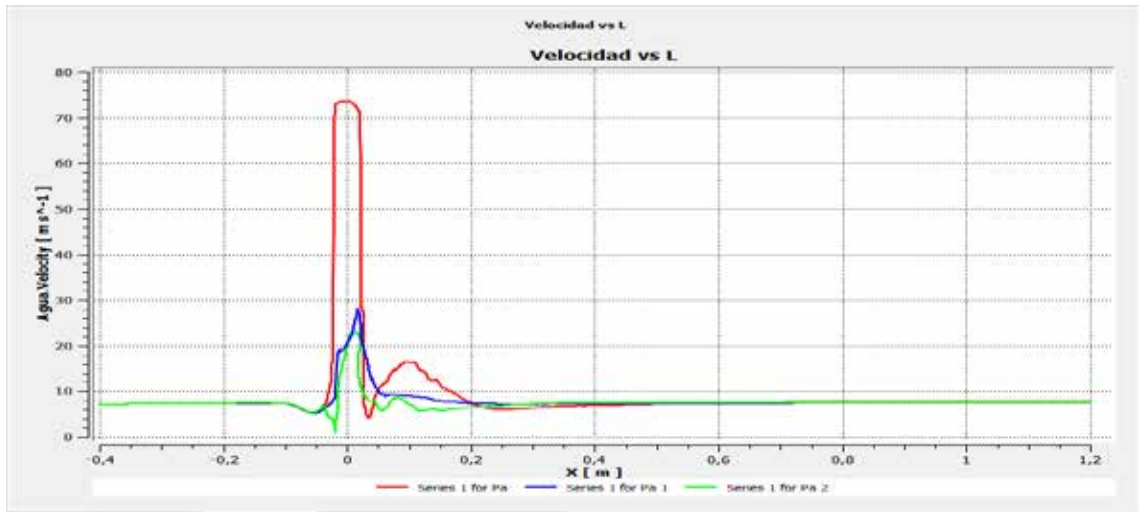
Gráfico Presión vs L



Gráfica 26. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

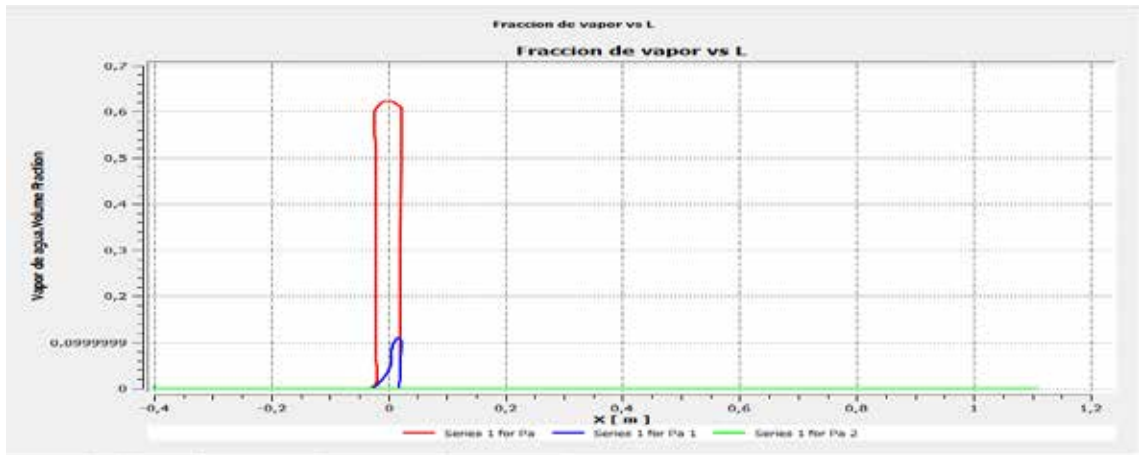
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 27. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 28. Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de Salida 3166Pa

Presión

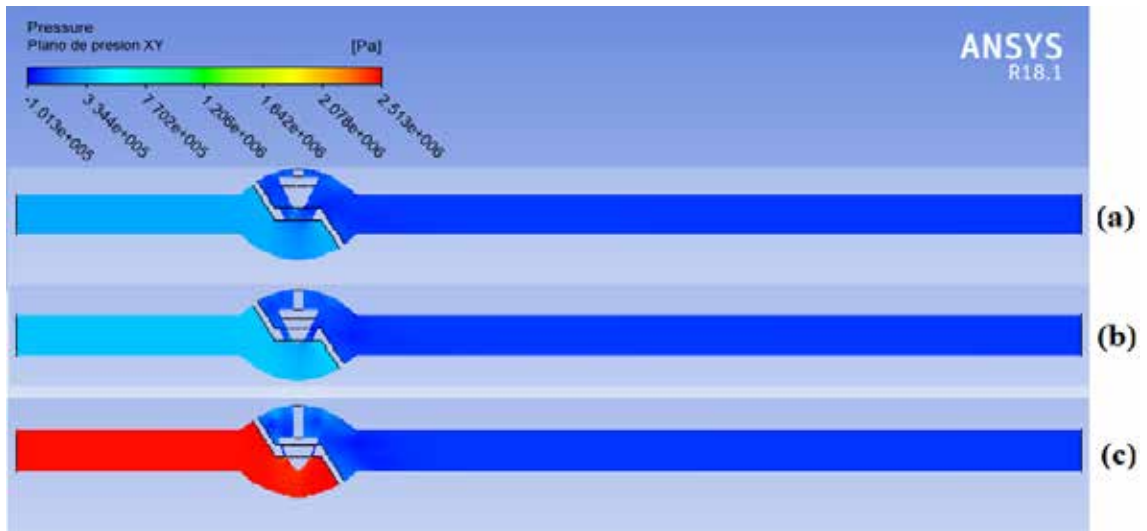


Figura 108. Presión sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

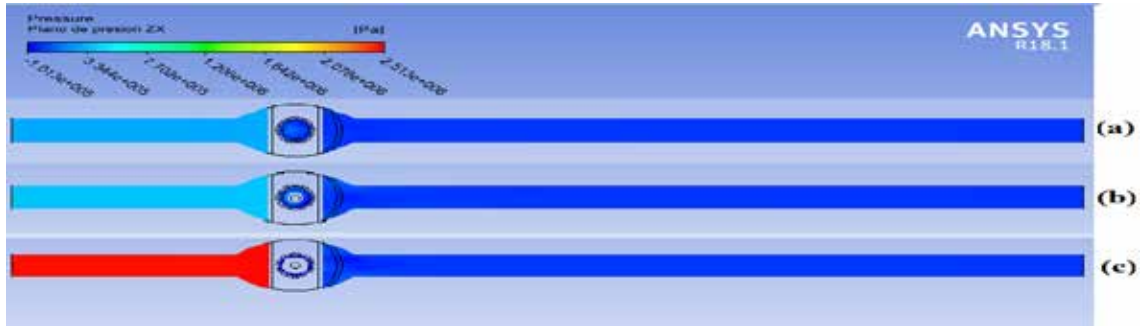


Figura 109. Presión sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Velocidad

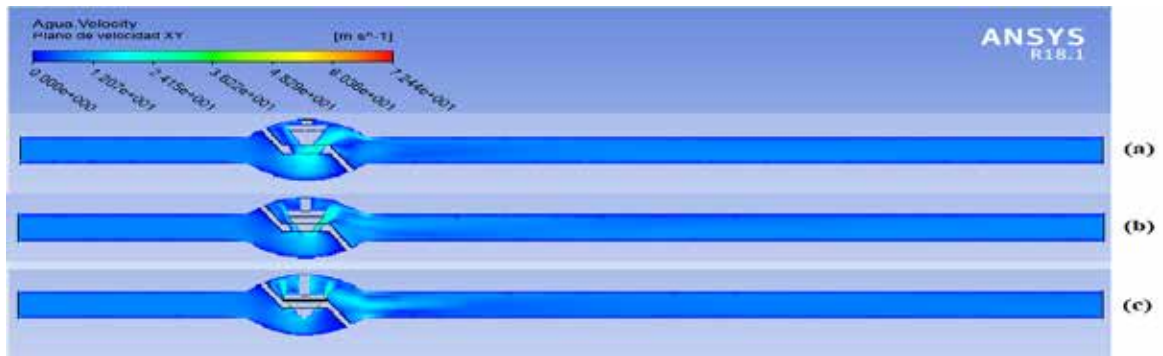


Figura 110. Velocidad sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



Figura 111. Velocidad sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Fracción de Vapor

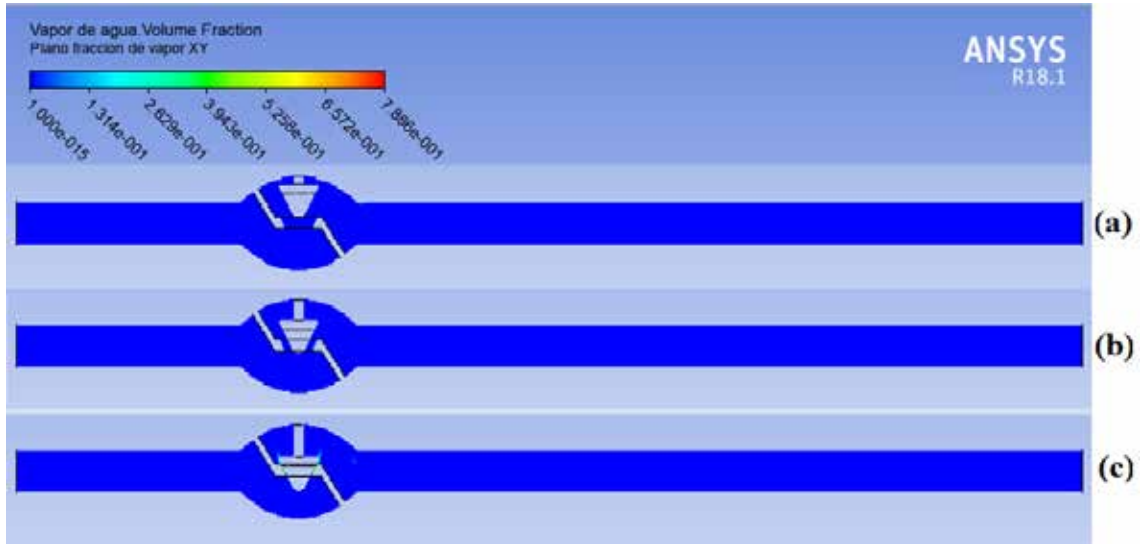


Figura 112. Fracción de vapor sobre el plano XY para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

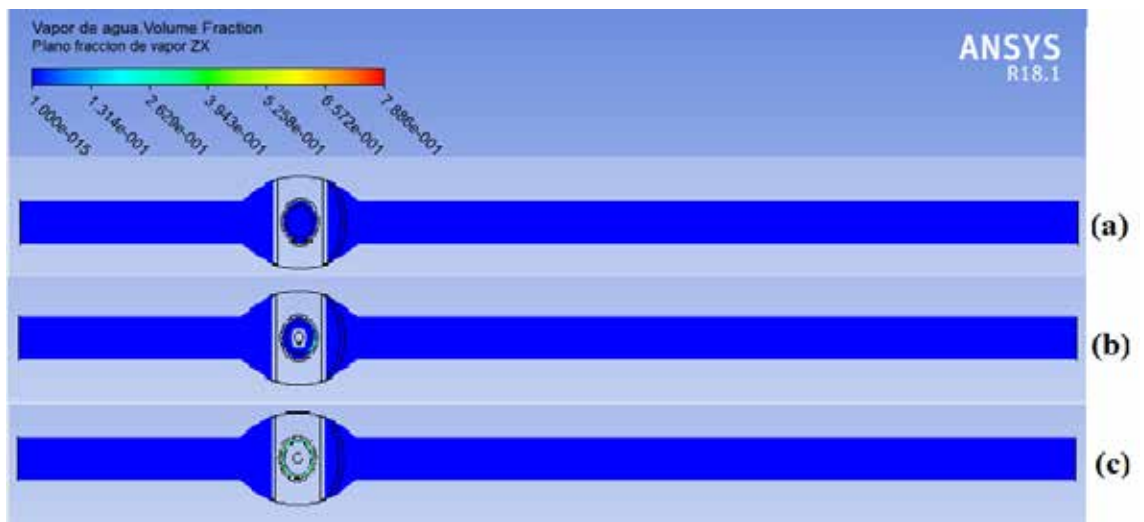
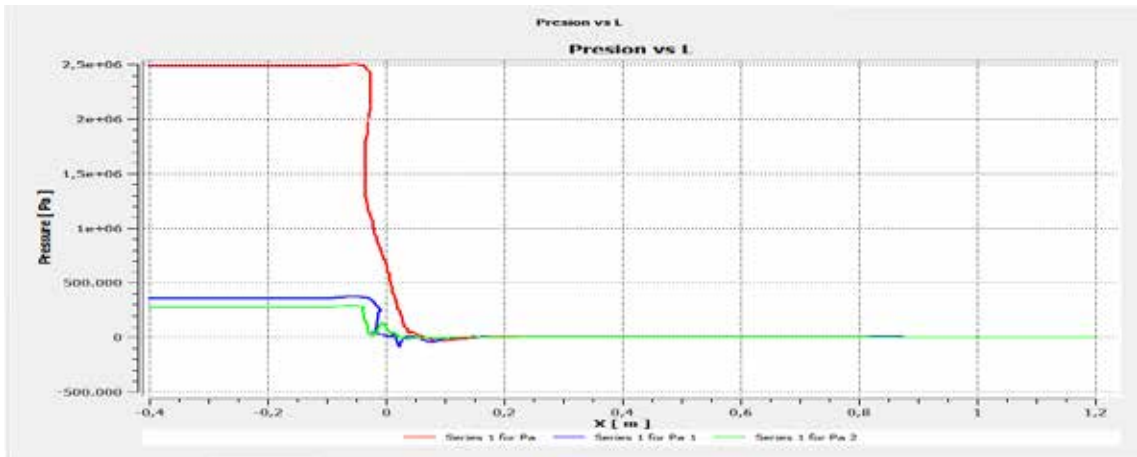


Figura 113. Fracción de vapor sobre el plano XZ para aperturas de (a) 75%, (b) 50% y (c) 25%.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

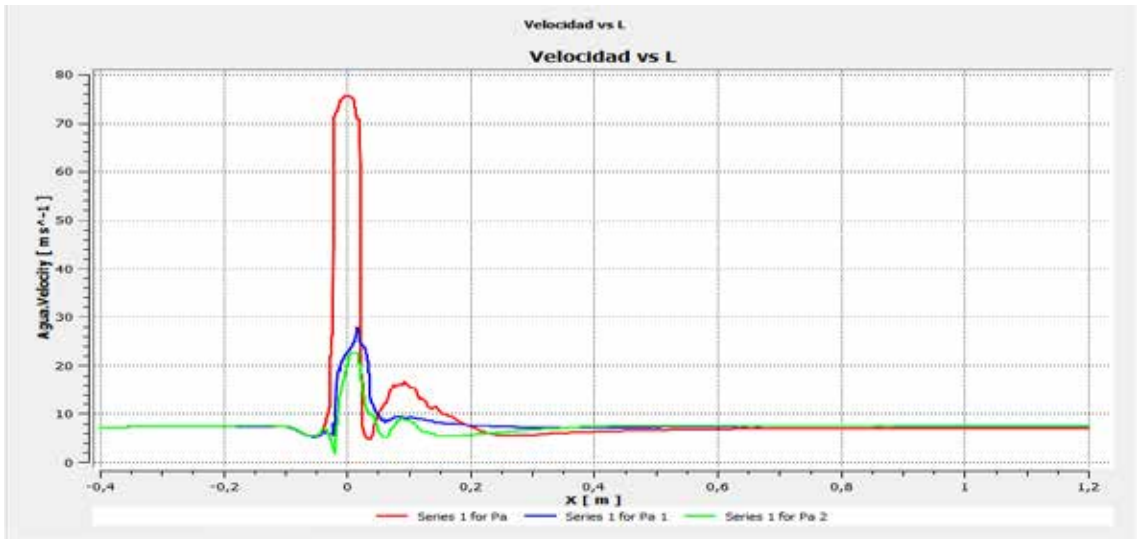
Gráfico Presión vs L



Gráfica 29. Presión vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

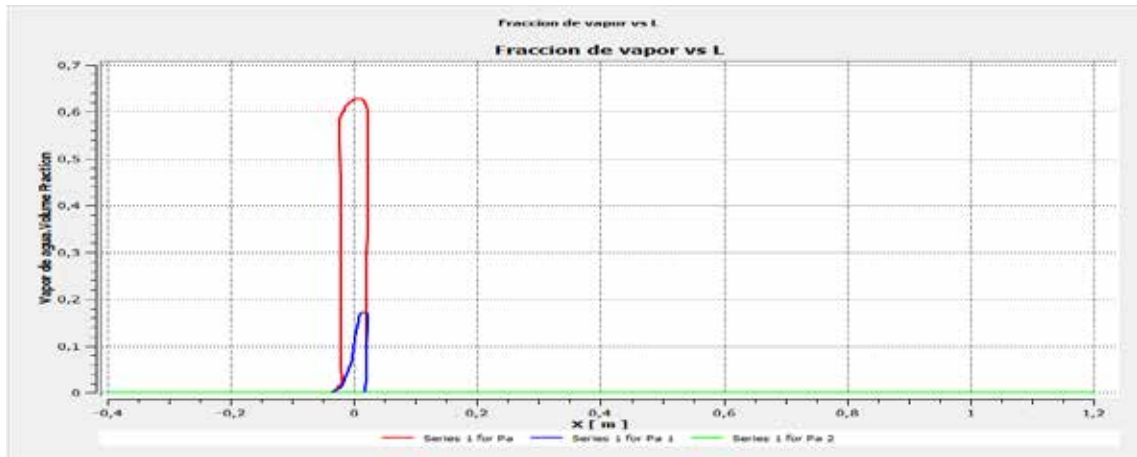
Gráfico Velocidad vs L



Gráfica 30. Velocidad vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Gráfico Fracción de Vapor vs L



Gráfica 31. Fracción de vapor vs Longitud (L) para aperturas de 25%(Rojo), 50%(Azul) y 75%(verde).

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Finalmente, se tienen los resultados de la simulación del flujo a través de la válvula de asiento cónico, al igual que en los otros dos casos, la presión aguas abajo no afecta en gran medida el comportamiento del flujo para un mismo porcentaje de apertura del obturador. Los cambios son notables a medida que se varía la posición del obturador, lo cual entrega mayor información sobre las variables que se están estudiando.

Para el caso de la presión, se observa que es una válvula que produce una gran caída de presión por su geometría característica, no es necesario obstruir el flujo con el obturador para producir una elevada pérdida de carga. En comparación con las otras dos válvulas, es la que más pérdida genera.

Seguidamente, al observar la velocidad, es de notar la cantidad de cambios de dirección a los que se enfrenta el flujo. Se observa como en el trayecto donde el flujo pasa a través del asiento del cono se eleva la velocidad, esto por el cambio de sección desde entrada del flujo al punto justo antes del asiento de la válvula. Al igual que los casos anteriores estas zonas son las mismas donde se produce mayor caída de presión.

Por otra parte, se observa que, debido al cambio de dirección del flujo, no es necesario mucha distancia desde el obturador para estabilizar la velocidad, por lo que esta válvula sería muy útil para aplicaciones de regulación de caudal.

Por último, la Cavitación, se observa que el volúmen de vapor que se forma en la cámara de la válvula es muy pequeño, siendo un resultado inesperado puesto a que se esperaba mayor concentración de vapor. La cavitación se genera en mayor medida al igual que los casos anteriores para el porcentaje de apertura de 25%.

Para una mejor visualización de los resultados se emplearon los gráficos P vs L, V vs L y Fracción de Vapor vs L, en ellos se muestra la magnitud de la variación del comportamiento de las variables en estudio.

Comportamiento de líneas de Flujo

Apertura 25%

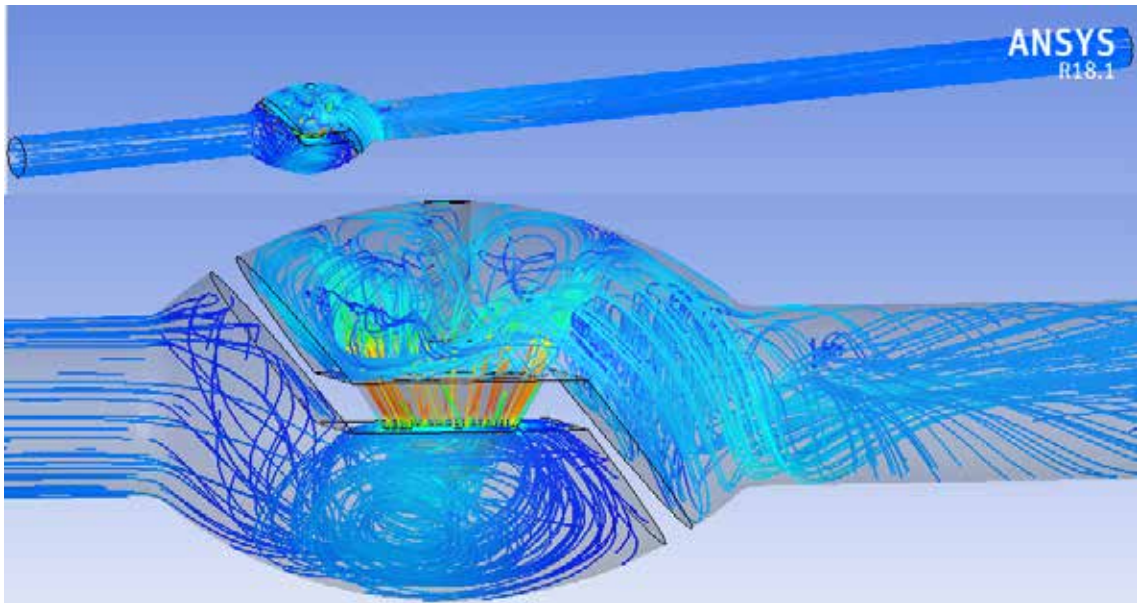


Figura 114. Líneas de flujo para válvula de asiento cónico con 25% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

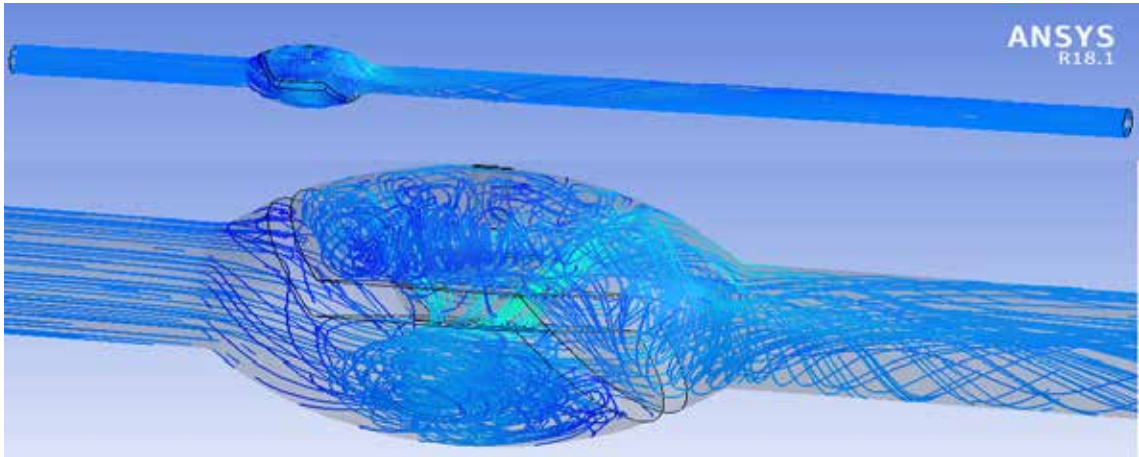


Figura 115. Líneas de flujo para válvula de asiento cónico con 50% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%

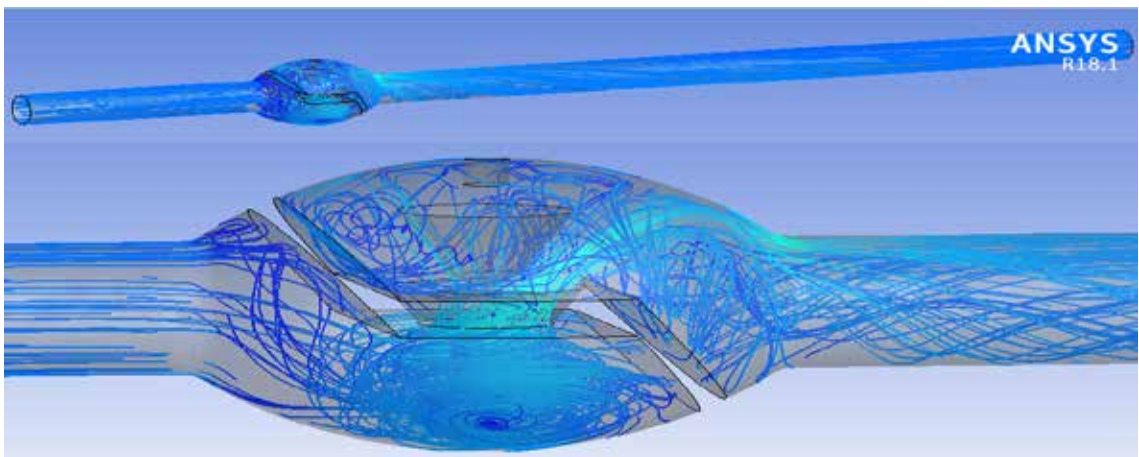


Figura 116. Líneas de flujo para válvula de asiento cónico con 75% de apertura.

Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Según se muestra en las figuras 114 a la 116, evidentemente el flujo a través de esta válvula se puede considerar “Caótico” en comparación con las líneas de flujo para la válvula de Bola y Compuerta. Se evidencia una alta formación de torbellinos tanto en la entrada como en la salida del flujo.

CONCLUSIONES

Mediante el método de simulación se analizó numéricamente el campo de flujo de agua a través del dominio fluidizado de la válvula de Bola, Compuerta y Asiento Cónico por medio de la aplicación de las ecuaciones de gobierno de masa, momento y el modelo de turbulencia k- y de cavitación de Rayleigh - Plesset que proporciona la base para el tipo de ecuación que controla la generación de vapor y condensación del fluido. Se concluye lo siguiente:

Se determinó teóricamente todas aquellas variables o parámetros que intervienen en la Cavitación, siendo los más relevantes, Presión, Velocidad y geometría del canal de flujo.

En el proceso de simulación, se logró la convergencia de las ecuaciones de gobierno y el modelo matemático de turbulencia k- en la mayoría de los casos, pero cuanto más vapor se formaba en el fluido, más complicada se hacía la solución y con ello se hizo difícil llegar a valores de RMS por debajo de $1 \cdot 10^{-5}$.

Se demostró que la Cavitación no depende totalmente de la diferencia de presión de la válvula, es decir, la caída de presión que ella produce en términos de la pérdida de carga hidráulica, sino que depende en gran medida del porcentaje de apertura que esta posee, mientras más se obstruye el paso del fluido es probable que se forme mayor cantidad de vapor.

Otro aspecto importante, la formación de Cavitación aumenta en aquellas zonas donde la presión cae considerablemente y la velocidad del flujo se eleva, la situación más crítica se da cuando se tienen las válvulas con 25% de apertura, en donde se generan zonas donde el fluido es casi 100% vapor de agua. Para un porcentaje de apertura de 50% en algunos casos es casi inapreciable el vapor que se genera.

Por consiguiente, en la válvula de bola, se produce una gran cantidad de turbulencia para bajos porcentajes de apertura. Además, que es una válvula donde se produce un elevado porcentaje de vapor en porcentajes de apertura de 50%.

En cuanto al flujo a través de la válvula de compuerta, tiene un estrangulamiento que no genera tanta distorsión en las líneas de flujo. Es una válvula que para 50% de apertura no produce gran cantidad de volúmen de vapor, por lo que para este grado de apertura todavía se está en la zona segura, pero si se obstruye más el canal de flujo la cantidad de vapor aumenta considerablemente.

En cuanto la válvula de asiento cónico, el flujo a través de ella es muy turbulento dentro de la cámara. Es la válvula que genera mayor caída de presión, pero la formación de vapor en esta válvula es muy poca en comparación con la válvula de bola y de compuerta. Los fabricantes afirman que este tipo de válvula tiene pocas probabilidades de producir cavitación, esto se confirma con los resultados obtenidos.

Debido a la geometría característica de la válvula de asiento cónico, se producen torbellinos tanto en la cámara inferior como en la cámara superior que generan una condición de estancamiento del flujo lo que trae consigo una estabilidad hidrodinámica que provoca que la velocidad del flujo disminuya cuando pasa de la cámara inferior a la superior. Esta estabilidad equilibra las presiones entre ambas cámaras y por esto no se tienen caídas bruscas de presión en los alrededores del obturador lo que permite un flujo con el mayor porcentaje en estado líquido.

De los tres porcentajes de apertura que se tomaron en cuenta en el presente estudio el de 25% resultó ser el más crítico en todos los casos, en los gráficos Presión vs Longitud, Velocidad vs Longitud y Fracción de vapor vs Longitud se confirmó, que para 25% de apertura es donde existe mayor diferencia entre el punto aguas arriba y aguas abajo.

La utilización de una herramienta como ANSYS® CFX es adecuada para realizar los análisis numéricos por método de volúmenes finitos, ya que los resultados se adaptan a la realidad física, sin recurrir a la necesidad de construir bancos de ensayos, ya que al ser una herramienta computacional se puede lograr controlar, aumentar o disminuir los fenómenos físicos que se encuentran presentes en el campo de flujo, como zonas propensas a recibir daños por cavitación clásica o por recirculación.

RECOMENDACIONES

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

Realizar las simulaciones en las válvulas que se tratan en el presente trabajo para otros porcentajes de apertura en donde se pueda ver el efecto del escalamiento de la generación de la fracción de volumen de vapor.

Aplicar la técnica de aproximación numérica CFD para el estudio del campo de flujo en accesorios tales como Codos, Tees, etc.

Obtener conocimientos en ANSYS® CFX, una materia o curso de capacitación enfocado a estudios de la dinámica de fluidos computacional.

Para aplicaciones donde se desea regular el caudal a través de una sección de tuberías es factible emplear válvulas de asiento cónico.

Cuando se desee flujo cero o máximo se pueden emplear válvulas de bola o de compuerta.

Se recomienda no utilizar las válvulas en grados de apertura intermedios, ya que se disminuye drásticamente la vida útil del sello, obturador y demás componentes.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar un trabajo destinado únicamente al estudio del dominio fluidizado de la válvula de asiento cónico para distintos diámetros nominales.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Amirante, R., Distaso, E. y Tamburrano, P. (2014). **Análisis Experimental y Numérico de Cavitación en Válvulas Direccionales Proporcionales Hidráulicas**. [En línea]. Recopilado el 21/10/2018 desde:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414006621>

Arias. F. (1999) **El Proyecto de Investigación: guía para su elaboración**. Venezuela. Editorial Episteme. 3^{era} edición. [Libro en Línea]. Recopilado el 25/06/2018 desde:

<https://es.slideshare.net/brendalozada/el-proyecto-de-investigacion-fidias-arias-3ra-edicion>

Arias, F. (2006) **El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica**. Venezuela. Editorial Episteme. 6^{ta} edición. [Libro en Línea]. Recopilado el 25/06/2018 desde:

<https://es.slideshare.net/perdomolisneth/fidias-g-arias-el-proyecto-de-investigacin-6ta-edicin-54405484>

Balcazar, F. (2013). **Análisis de las variables de la Cavitación en Bombas Horizontales**. [Trabajo de grado en línea]. Instituto Politécnico Nacional – México. Recopilado el 17/11/2018 desde:

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12302/balcazarcruz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Balestrini, M. (2001). **Como se elabora el proyecto de investigación**. [Libro en Línea]. 5^{ta} edición. Ediciones BL Consultores Asociados. Recopilado el 17/11/2018 desde: https://issuu.com/sonia_duarte/docs/como-se-elabora-el-proyecto-de-inve

Baptista (2010). **Metodología de la Investigación**. [Libro en Línea]. 5^{ta} edición.

Ediciones McGraw-Hill. Recopilado el 24/07/2018 desde:

https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigacion%20C3%B3n%205ta%20Edici%C3%B3n.pdf

Behar, D. (2008). **Metodología de la Investigación**. Ediciones Shalom. [Libro en

Línea]. Recopilado el 24/07/2018 desde:

<http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20investigacion%20este.pdf>

Cengel, Y. y Cimbala, J. (2006). **Mecánica de Fluidos. Fundamentos y**

Aplicaciones. [Libro en Línea]. 1^{era} edición. Ediciones McGraw-Hill.

Recopilado el 22/02/2017 desde: <https://www.elsolucionario.org/mecanica-de-fluidos-fundamentos-y/>

Crane. (2011). **Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías**. [Libro en línea].

1^{era} edición. Ediciones McGraw-Hill. Recopilado el 06/10/2018 desde:

<https://www.elsolucionario.org/flujo-de-fluidos-en-valvulas-accesorios-y-tuberias-crane-1ra-edicion/>

Duarte, A. y Montevideo, N. (2011). **ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CAMPO DE**

FLUJO A TRAVÉS DEL DOMINIO FLUIDIZADO IMPULSOR -

VOLUTA EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA. [Trabajo de grado en línea].

Universidad de Carabobo (UC) - Venezuela. Recopilado el 10/04/2019 desde:

<http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/6981/arnaduarte.pdf?sequence=1>

Durán, A. (2014). **Notas sobre Dinámica de Fluidos Computacional**. [En línea].

Recopilado el 16/11/2018 desde:

https://torroja.dmt.upm.es/adrian/wp-content/uploads/2013/10/Notas_CFD_ALozano_20141.pdf

- Escalante, S. (2014). **Válvulas**. [En línea]. Recopilado el 16/11/2018 desde:
<http://blogs.unellez.edu.ve/sharon/files/2016/10/Sinopsis-Valvulas.pdf>
- Franzini, J. y Finnemore, J. (1999). **Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería**. [Libro en Línea]. 9^{na} edición. Ediciones McGraw-Hill. Recopilado el 24/02/2017 desde: <https://www.elsolucionario.org/mecanica-fluidos-aplicaciones-ingenieria-joseph-b-franzini-e-john-finnemore-9na-edicion/>
- Hernández, R. (2010). **Metodología de la investigación**. [Libro en Línea]. 5^{ta} edición. Ediciones McGraw-Hill. Recopilado el 17/11/2018 desde:
https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigacion%205ta%20Edicion.pdf
- Lezama, J. (2009). **Evaluación de los criterios de selección de las diferentes Válvulas de Control utilizadas en el negocio del Gas Natural**. [Trabajo de grado en Línea]. Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui - Venezuela. Recopilado el 17/11/2018 desde:
<http://ri2.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/877/2/18-TESES.IP009.L53.pdf>
- Liu, B., Zhao, J. y Qian, J. (2017). **Análisis Numérico de la Erosión por Cavitación y la Erosión por Partículas en Válvula de Mariposa**. [En línea]. Recopilado el 21/10/2018 desde:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630717302157>
- Marchegiani, A. (2006). **Cavitación**. [Documento en línea]. Universidad Nacional del Comahue, Argentina. Recopilado el 14/10/2018 desde:

- Mott, R. (2006). **Mecánica de Fluidos**. [Libro en línea]. 6^{ta} edición. Ediciones Pearson Educación. Recopilado el 16/04/2017 desde:
<https://es.slideshare.net/cnunezo/mecanica-defluidosrobertmott6taedicion-45454979>
- Nace, R. (1970). **El Agua y El Hombre: Panorama Mundial**. [Documento en línea]. Recopilado el 28/10/2018 desde:
<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001281/128176so.pdf>
- Pachano, L. y Pérez, F. (s.f.). **Válvulas de Control**. [En línea]. Universidad Nacional Experimental del Táchira Venezuela. Recopilado el 17/11/2018 desde:
http://www.unet.edu.ve/~nduran/Teoria_Instrucontrol/Valvulas_de_control.pdf
- Rivero, B. (2008). **Libro de Metodología de la investigación**. [Libro en Línea]. Ediciones Shalom, Recopilado el 16/11/2018 desde:
<http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20investigacion%20este.pdf>
- Saludes, A. (2015). **Estudio para la resolución numérica de las Ecuaciones de Conservación de la Masa, Cantidad de Movimiento y Energía, aplicado a la influencia del comportamiento de un fluido en la aerodinámica de un cuerpo romo**. [Trabajo de grado en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) – España. Recopilado el 16/11/2018 desde:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78446/REPORT.pdf>
- Sánchez, J. (2018). **ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL DEL CAMPO DE FLUJO ALREDEDOR DE UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA**. [Trabajo de grado]. Universidad José Antonio Páez (UJAP) - Venezuela. Recopilado el 10/04/2019.

Tamayo, M. (2003). **El Proceso de la Investigación Científica**. [Libro en Línea]. 4^{ta} edición. Ediciones Limusa. Recopilado el 18/11/2018 desde:
<https://clea.edu.mx/biblioteca/Tamayo%20Mario%20-%20El%20Proceso%20De%20La%20Investigacion%20Cientifica.pdf>

[En Línea]. Recopilado el 16/11/2018 desde:
<http://tesisdeinvestig.blogspot.com/2014/06/como-realizar-el-capitulo-iii-de-un.html>

Torres, J. C. (s.f.). **Diseño asistido por Ordenador**. [En línea]. Recopilado el 16/11/2018 desde:
<https://lsi.ugr.es/~cad/teoria/Tema1/RESUMENTEMA1.PDF>

Uribe, A. (2009). **Diseño y Construcción de un Banco para Pruebas en Campo de Válvulas Industriales**. [Trabajo de grado en Línea]. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga – Colombia. Recopilado el 14/10/2018 desde:
https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/659/digital_18397.pdf?sequence=1

Valdés, J., Rodríguez, J., Monge, R., Peña, J. y Pütz, T. (2013). **Simulación Numérica y Validación Experimental del Flujo de Cavitación a través de una Válvula de Retención de Bola**. [En línea]. Recopilado el 11/10/2018 desde:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413007590>

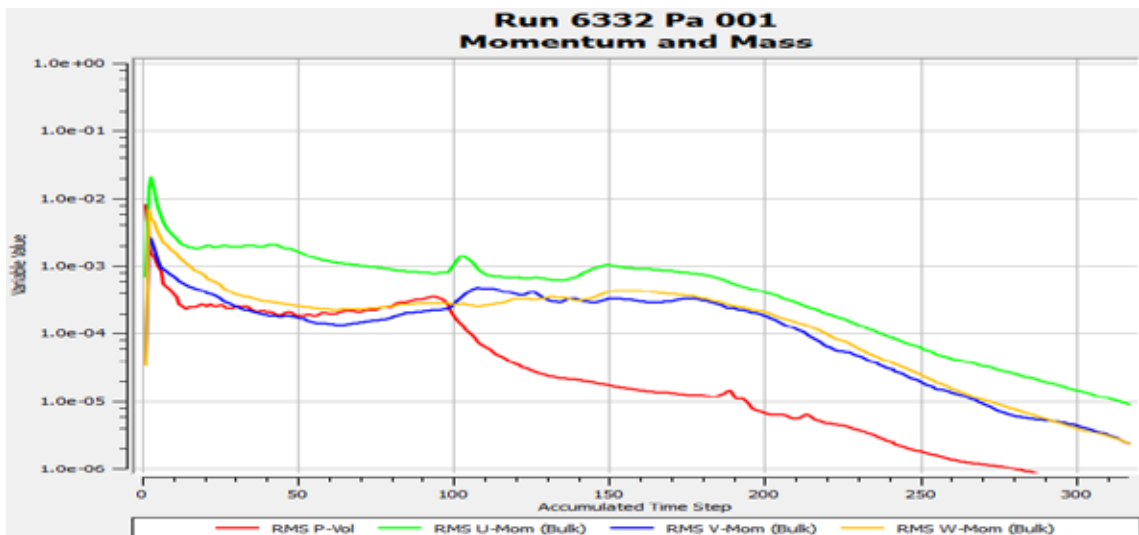
Villaruel, Q. (2015). **Simulación Numérica de un Flujo de Agua a través de una Válvula tipo Mariposa de Doble Excentricidad**. [Trabajo de grado en Línea]. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Recopilado el 11/10/2018 desde:
http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/6408/VILLARROEL_LUIS_SIMULACION_NUMERICA_FLUJO_AGUA.pdf?sequence=4

APÉNDICE

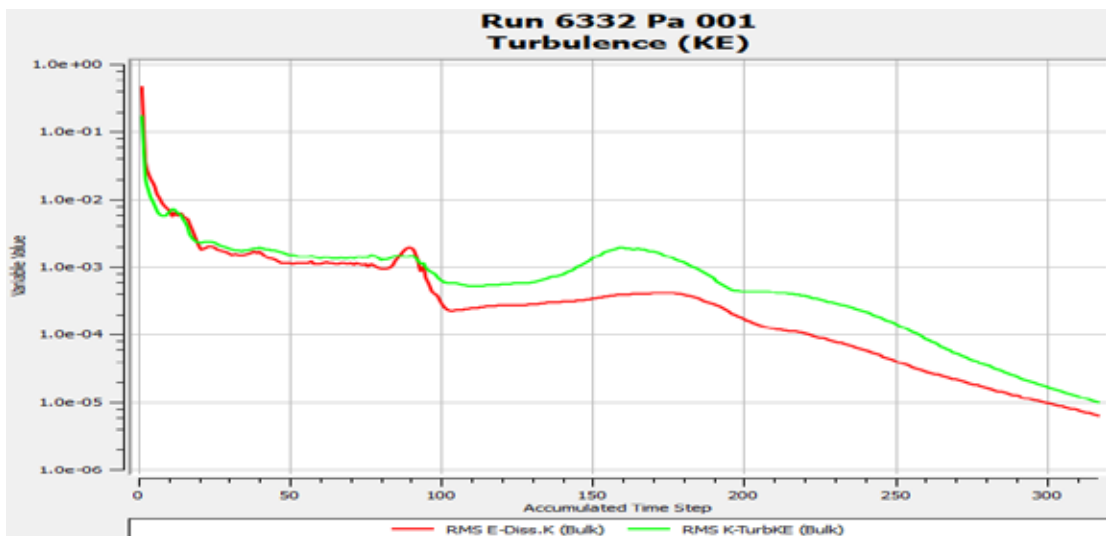
Convergencia de Simulación para válvula de Bola

Presión de salida 6332Pa

Apertura 25%

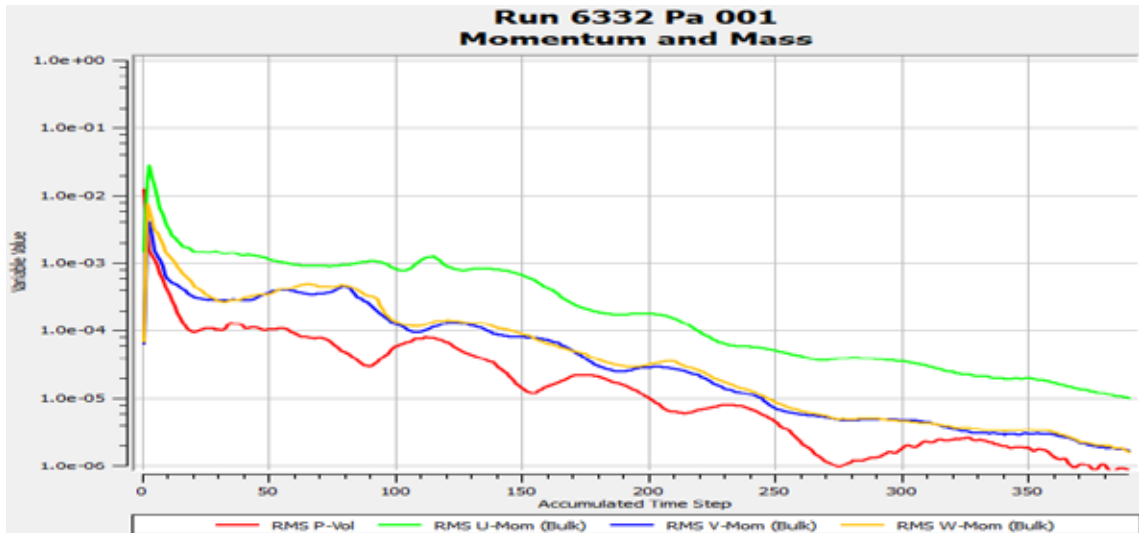


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

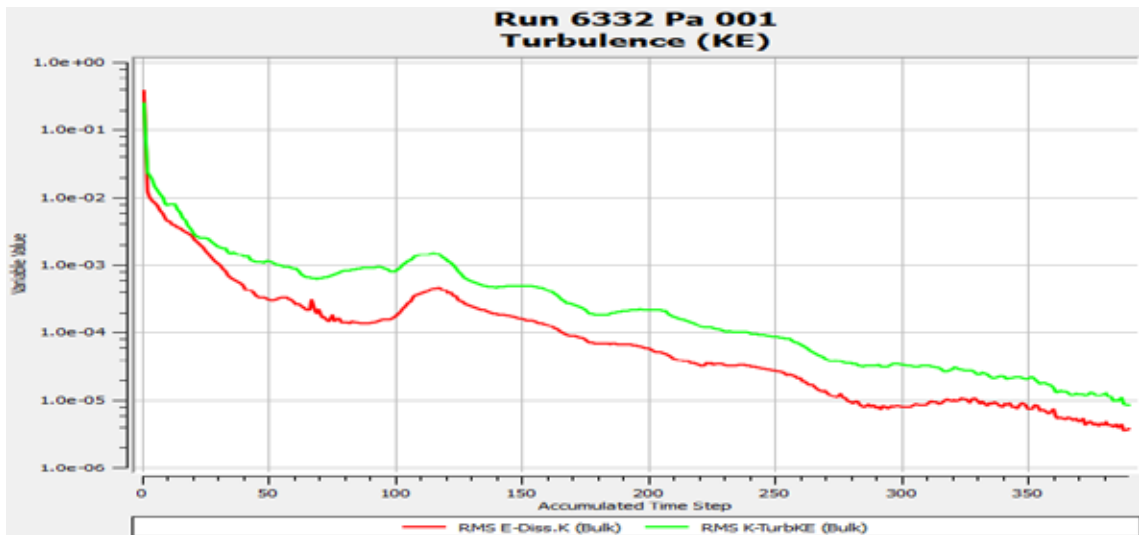


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

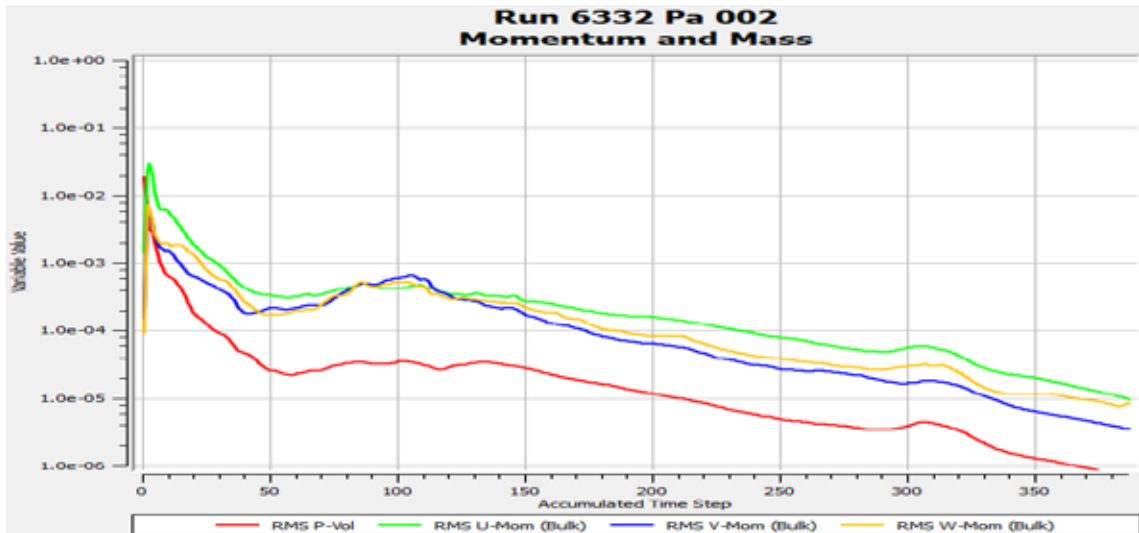


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

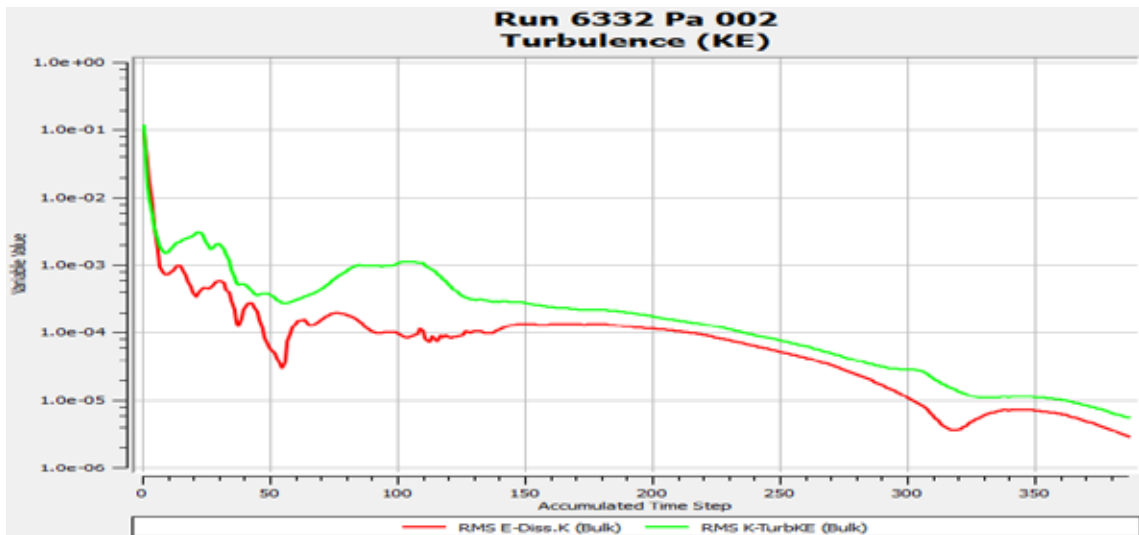


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



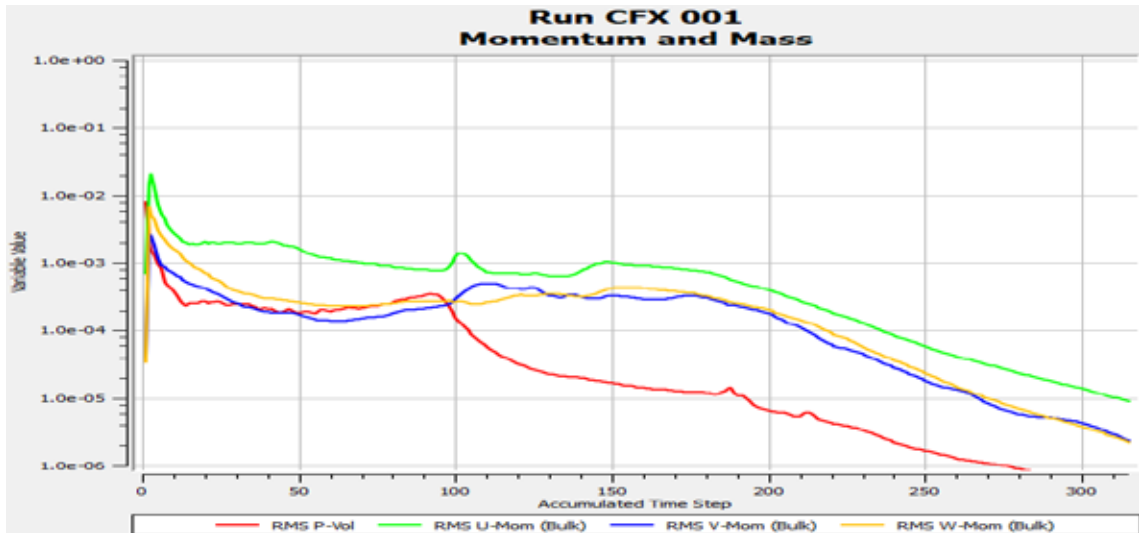
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



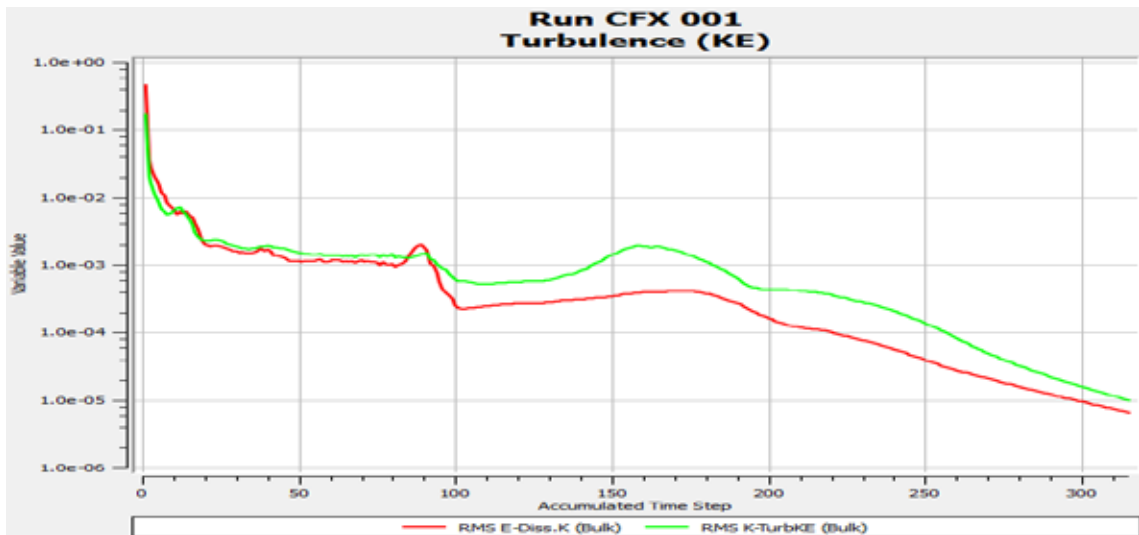
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de salida 4749Pa

Apertura 25%

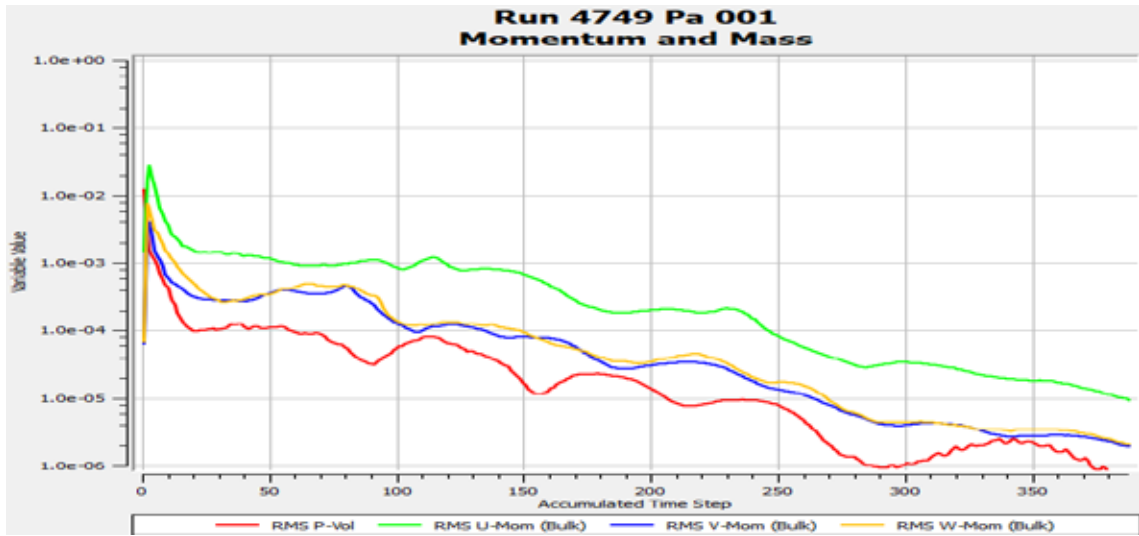


Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

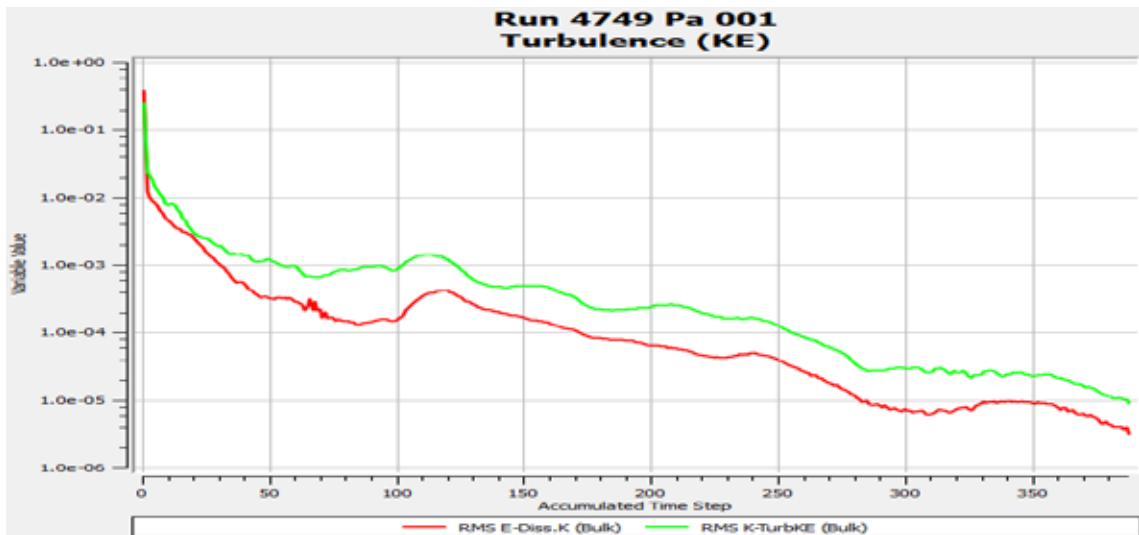


Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

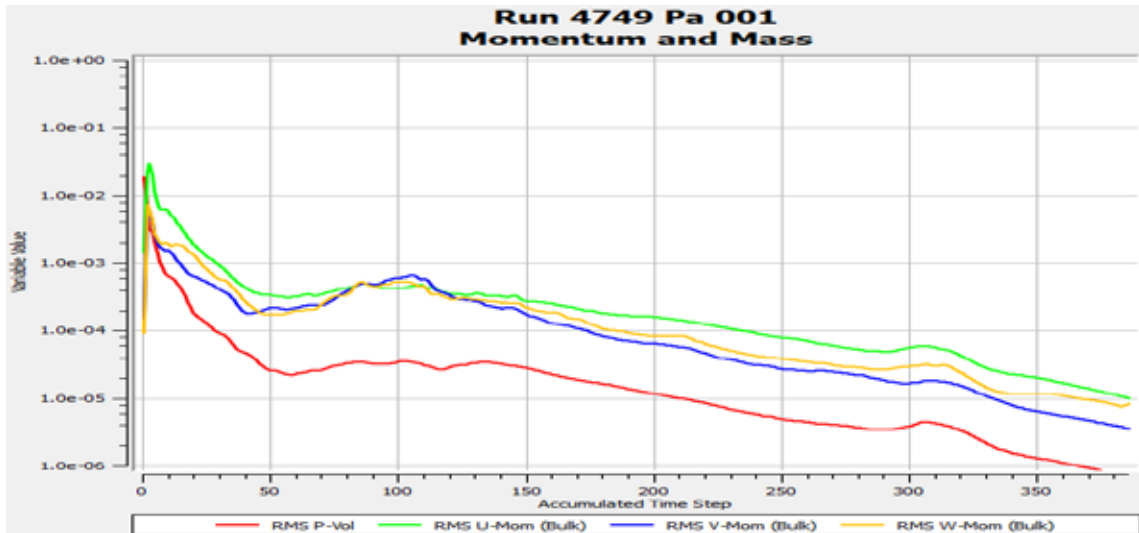


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

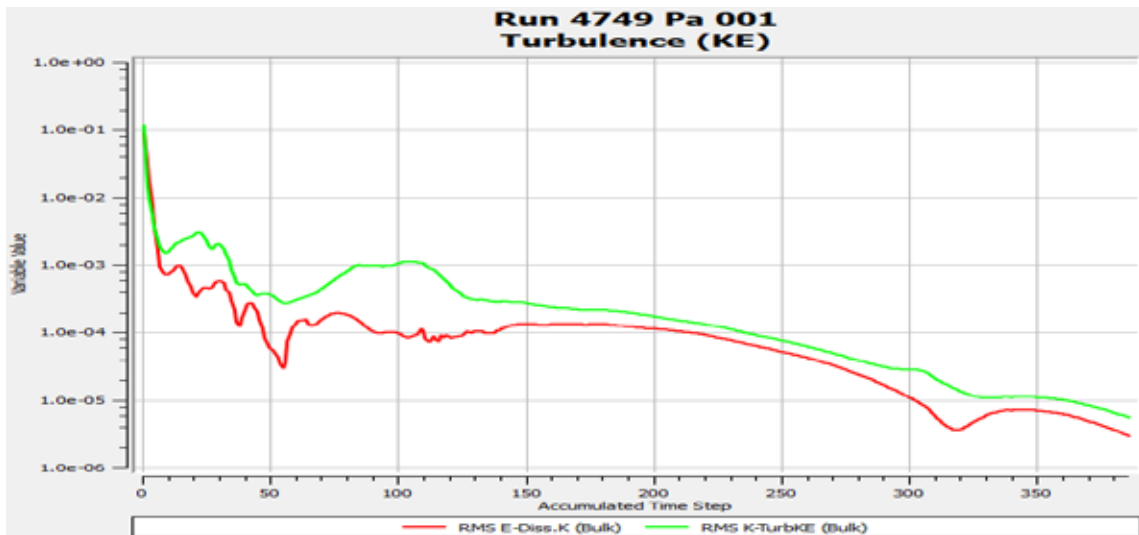


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



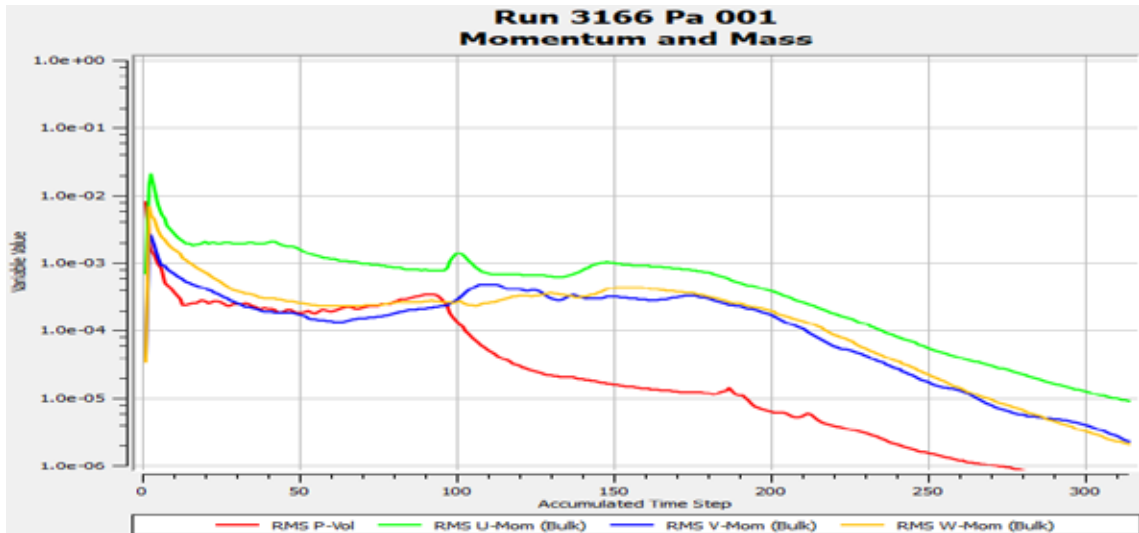
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



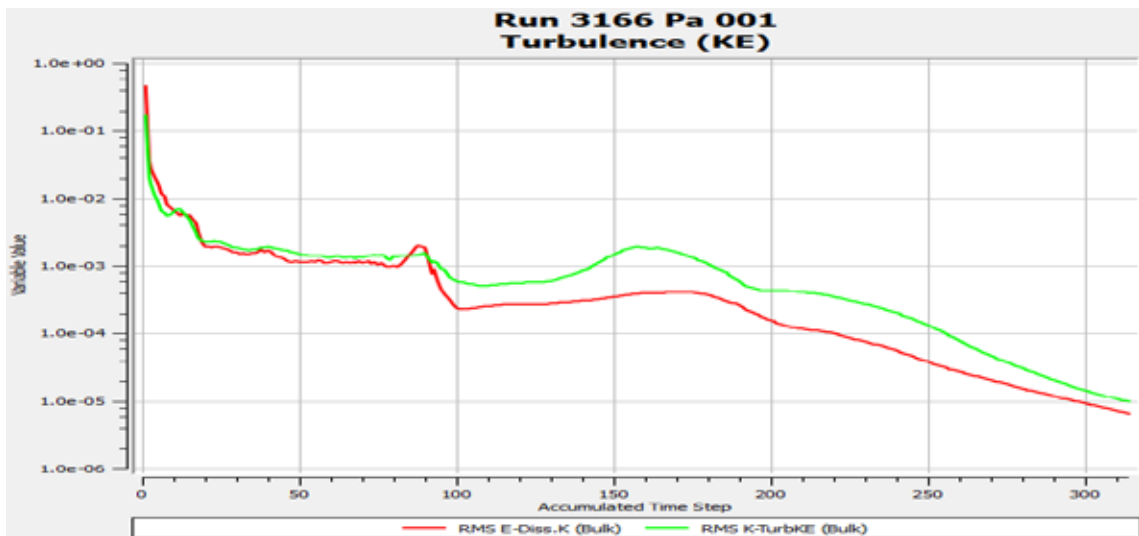
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de salida 3166Pa

Apertura 25%

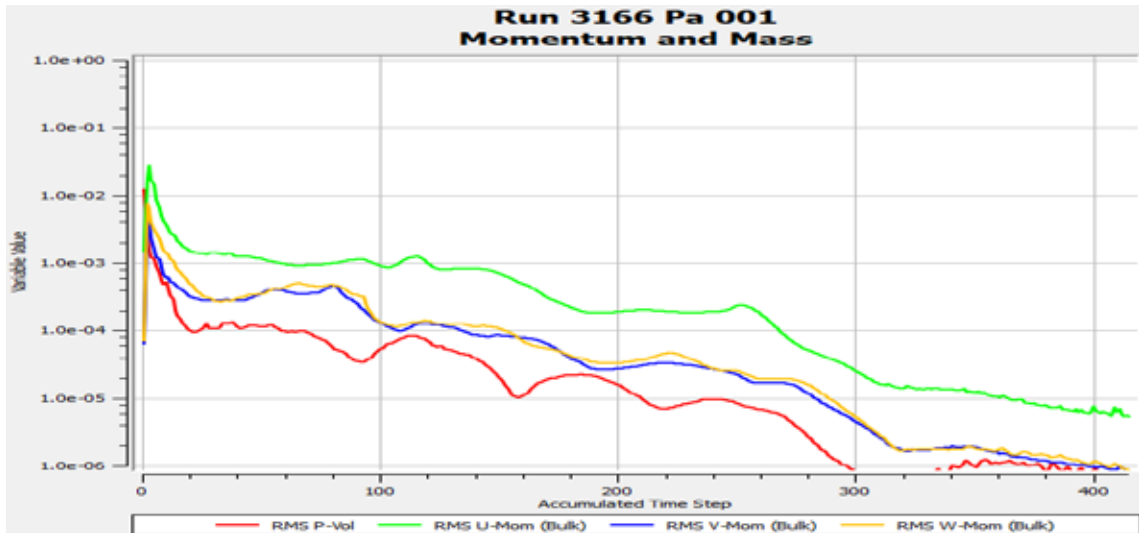


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

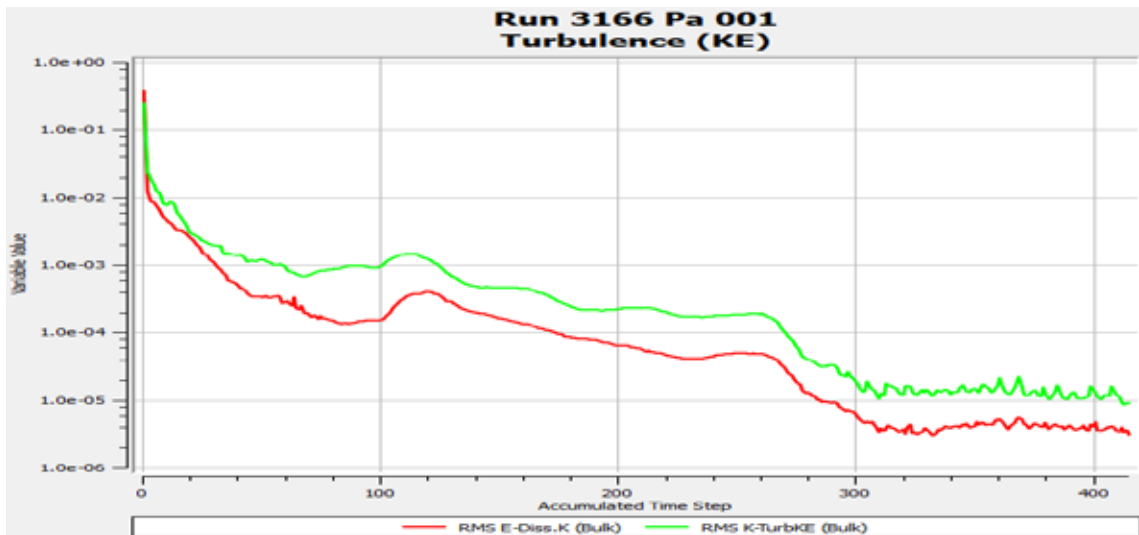


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

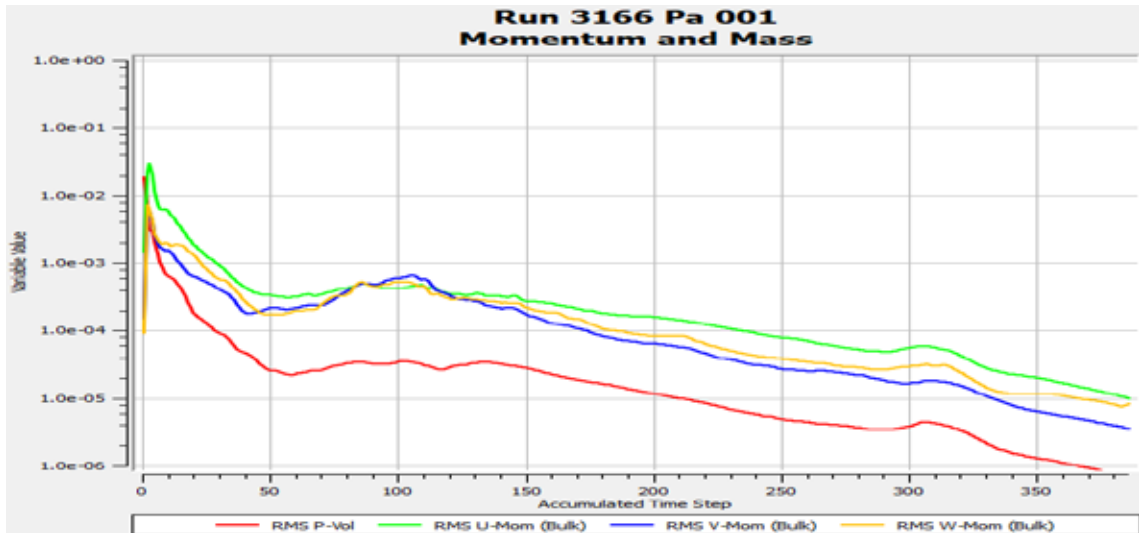


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

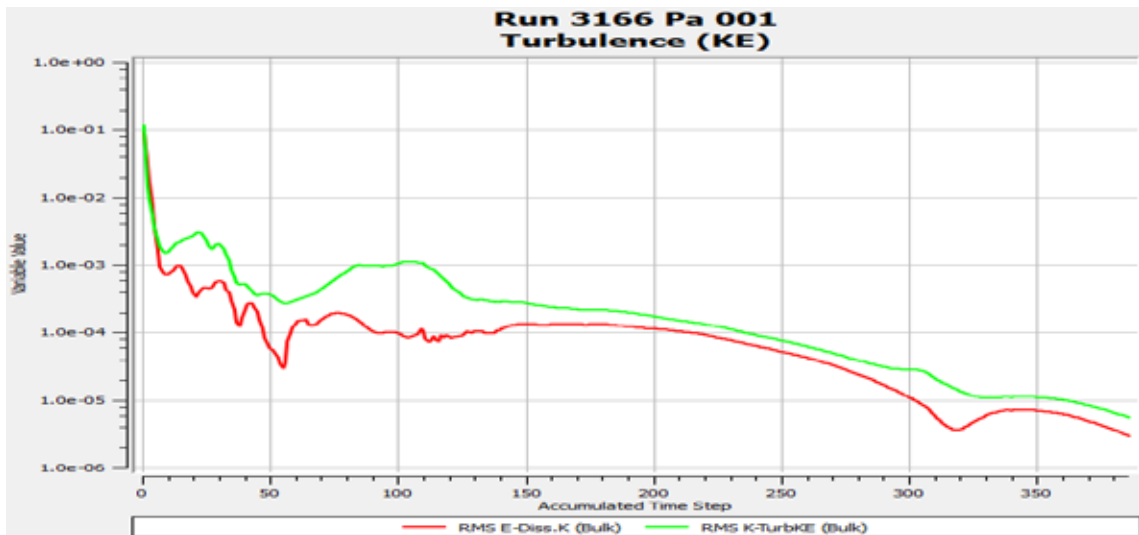


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

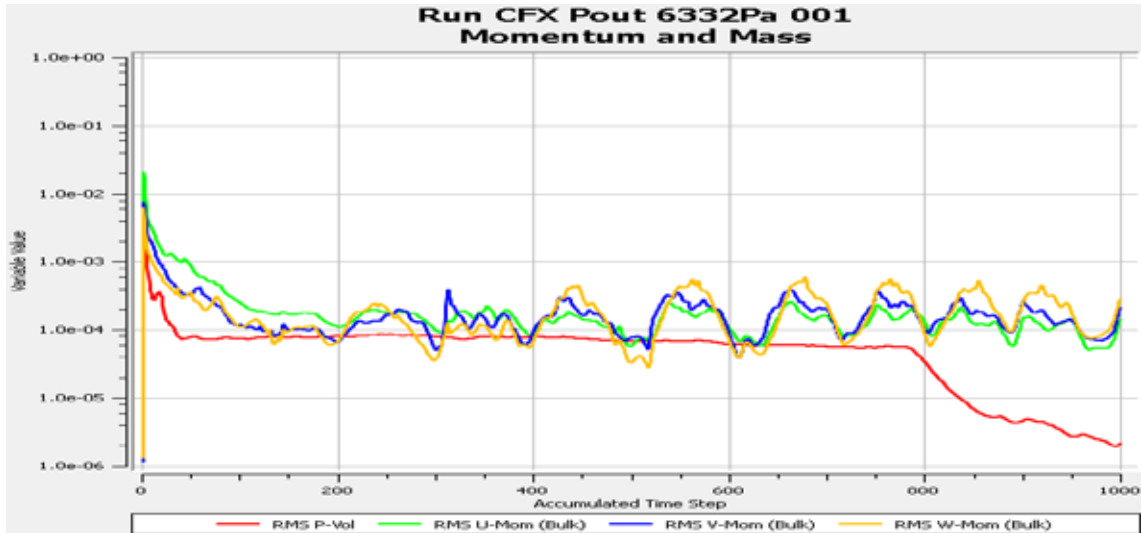


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

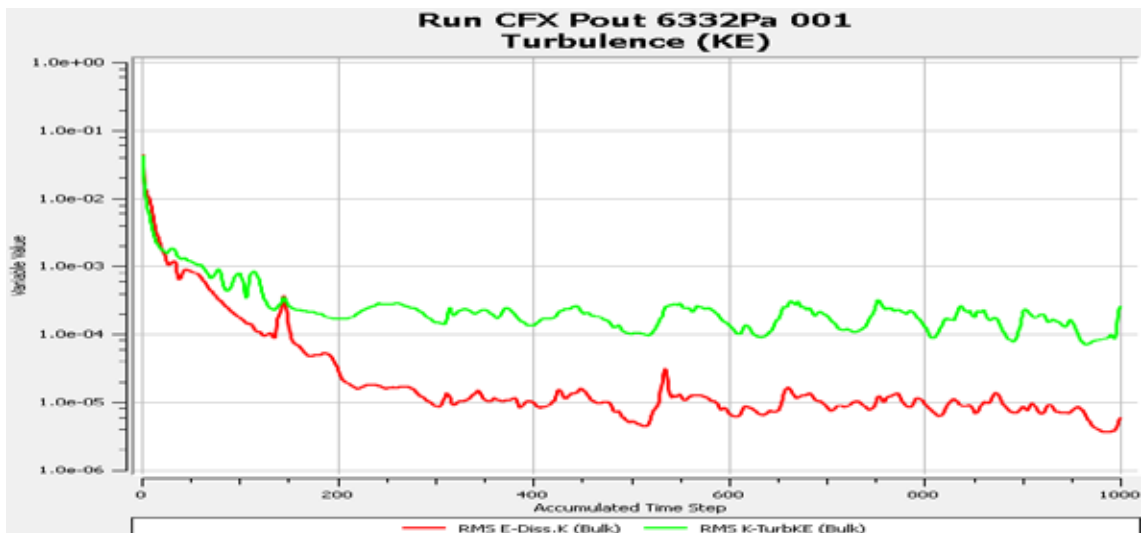
Convergencia de Simulación para válvula de Compuerta

Presión de salida 6332Pa

Apertura 25%

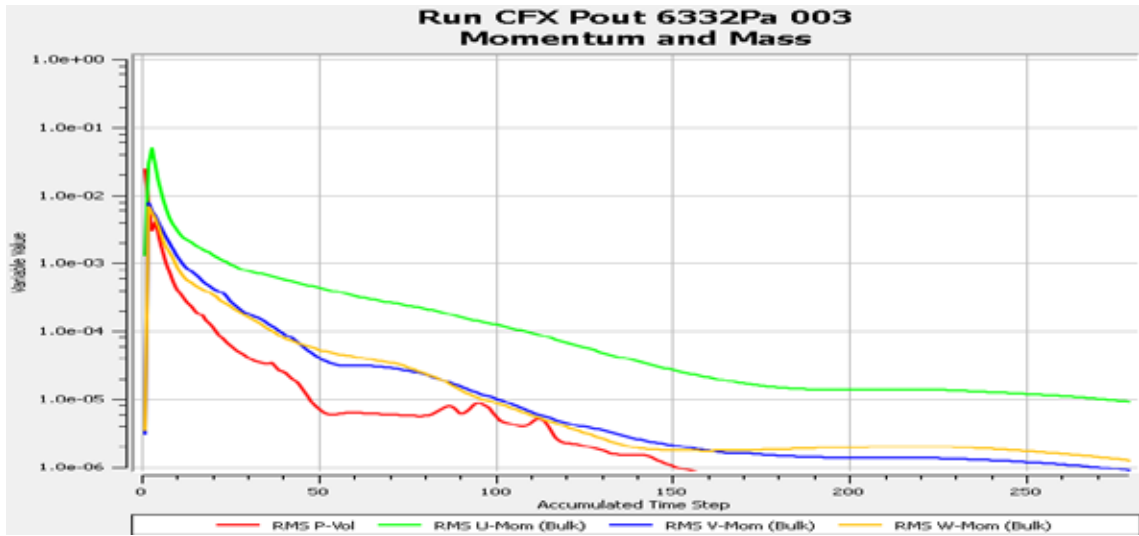


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

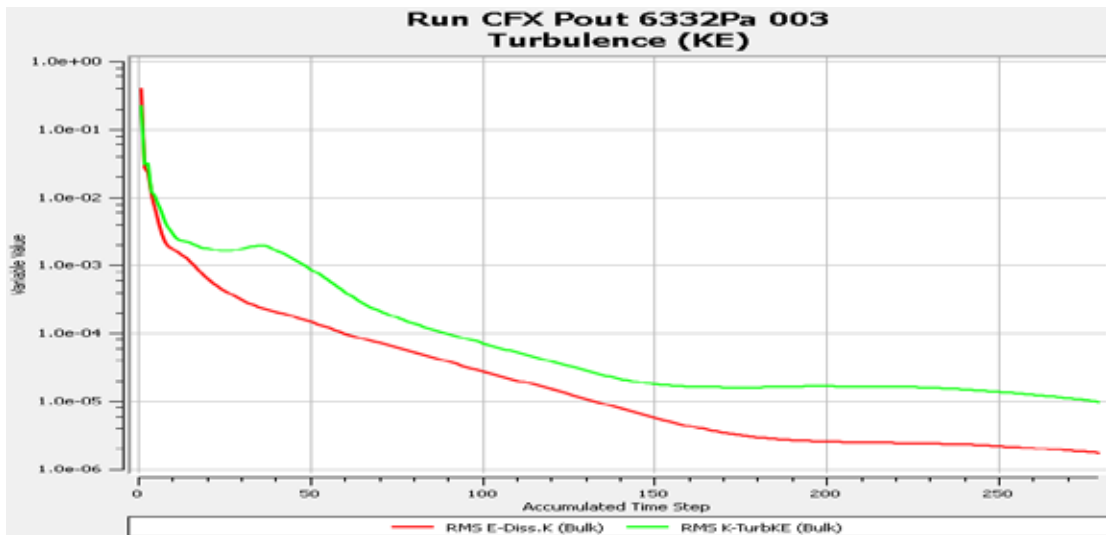


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

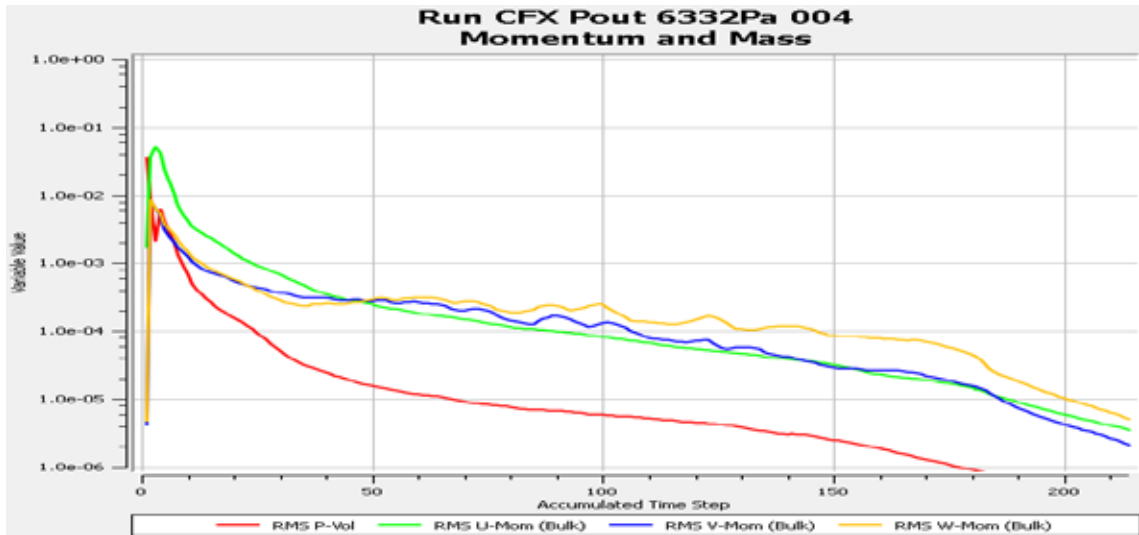


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

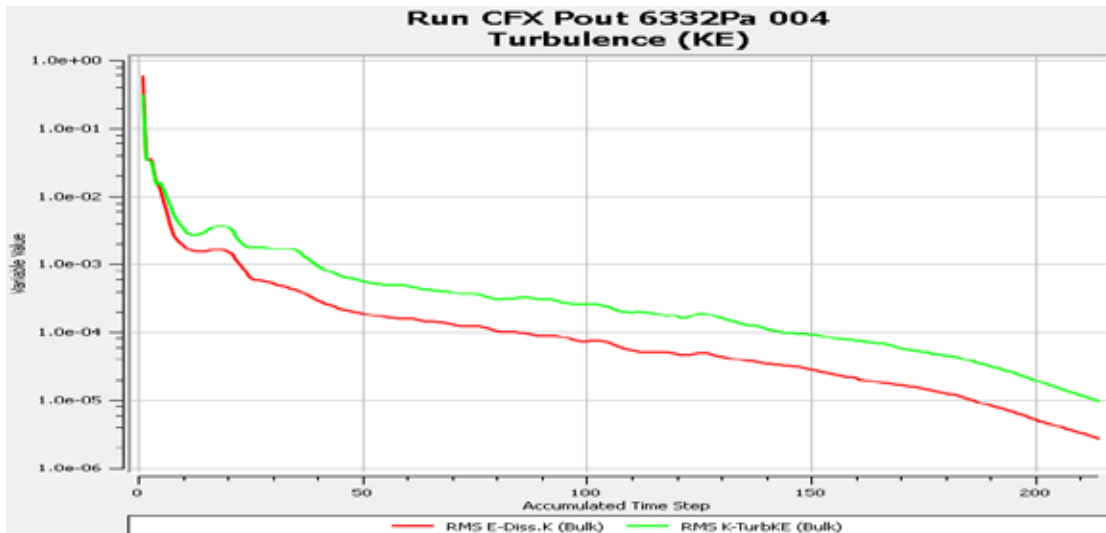


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



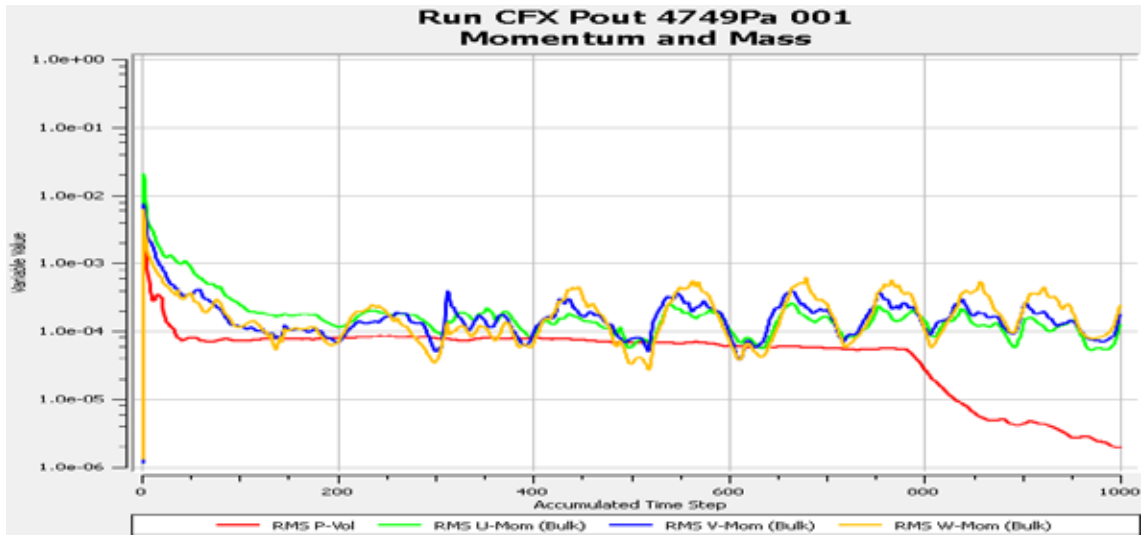
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



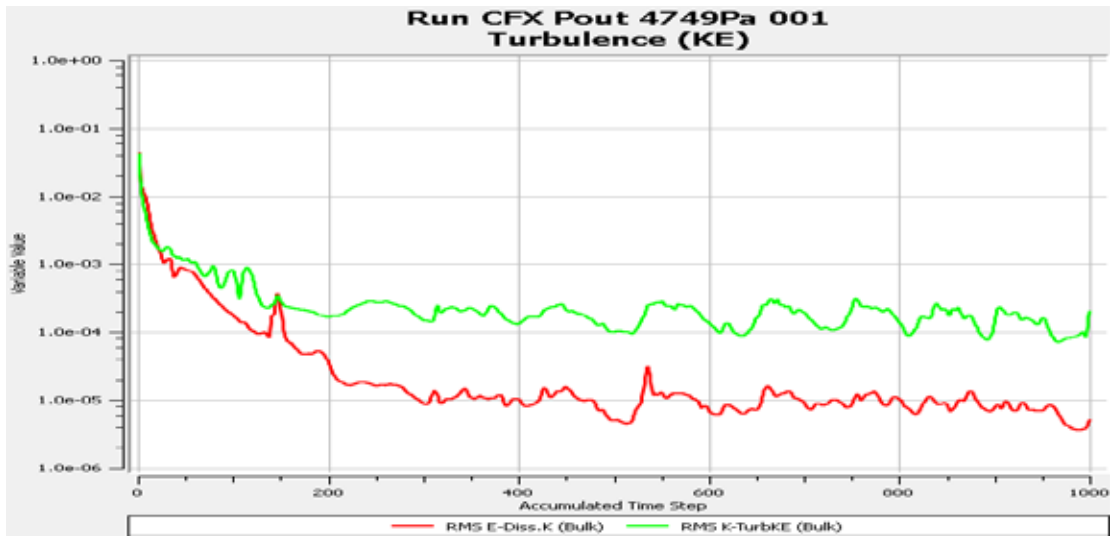
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de salida 4749Pa

Apertura 25%

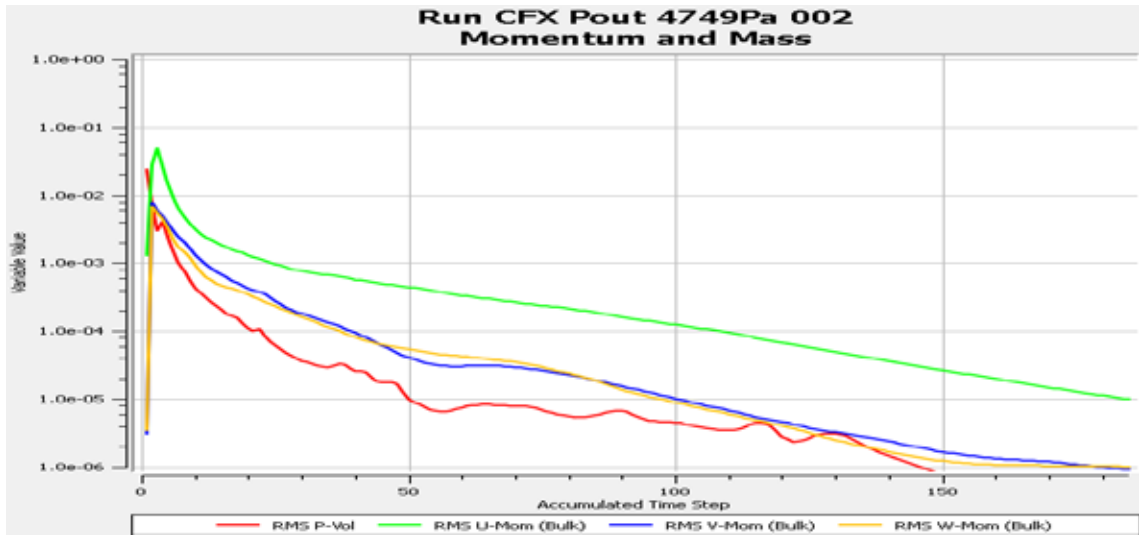


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

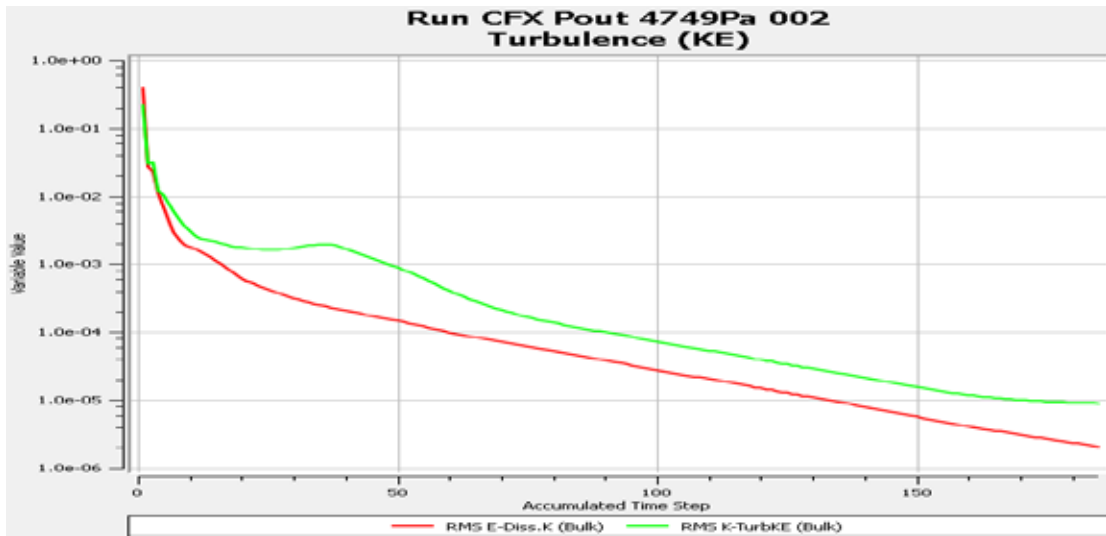


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

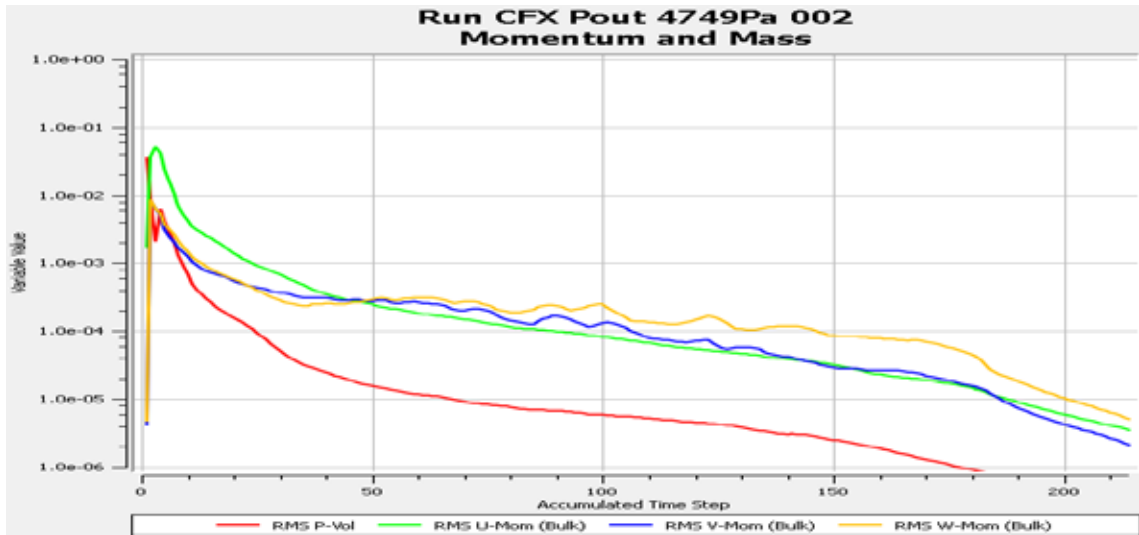


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

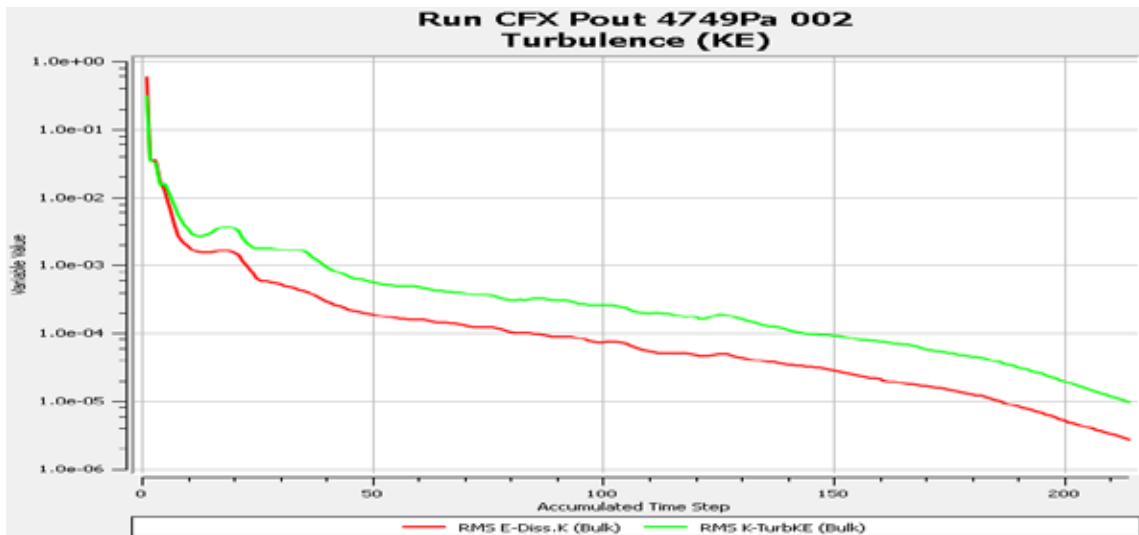


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



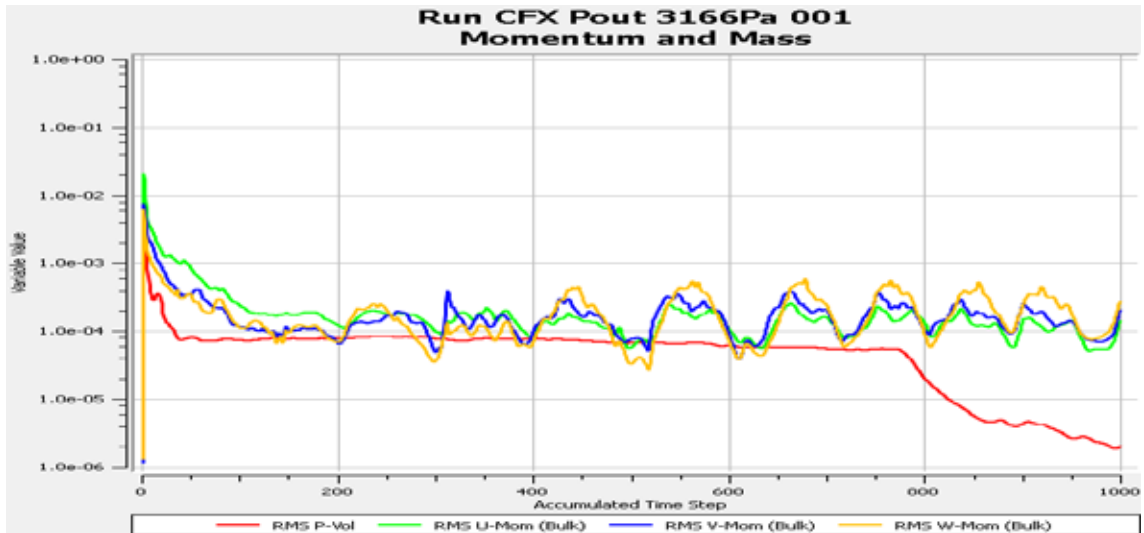
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



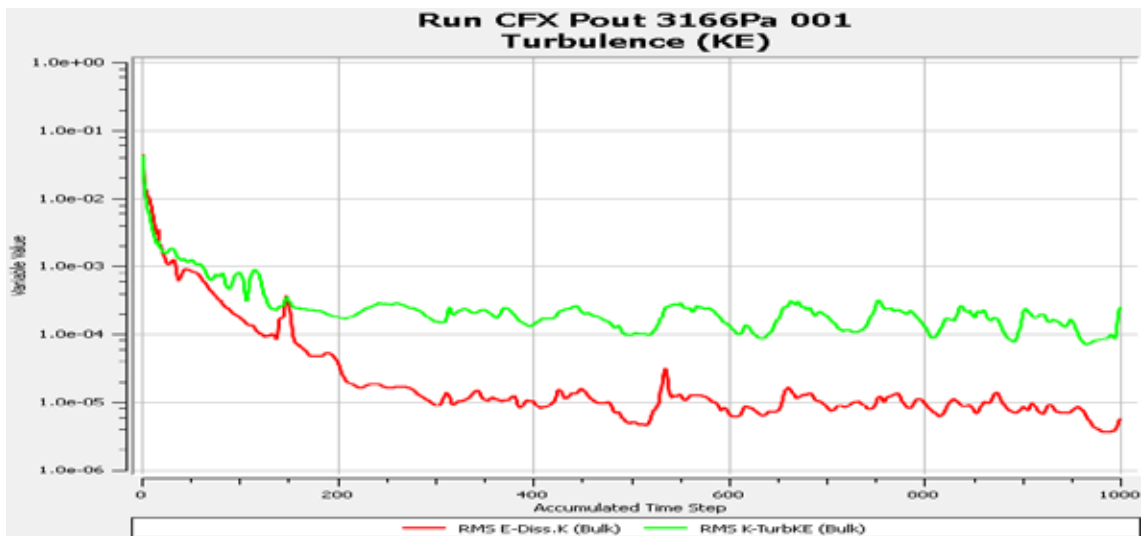
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de salida 3166Pa

Apertura 25%

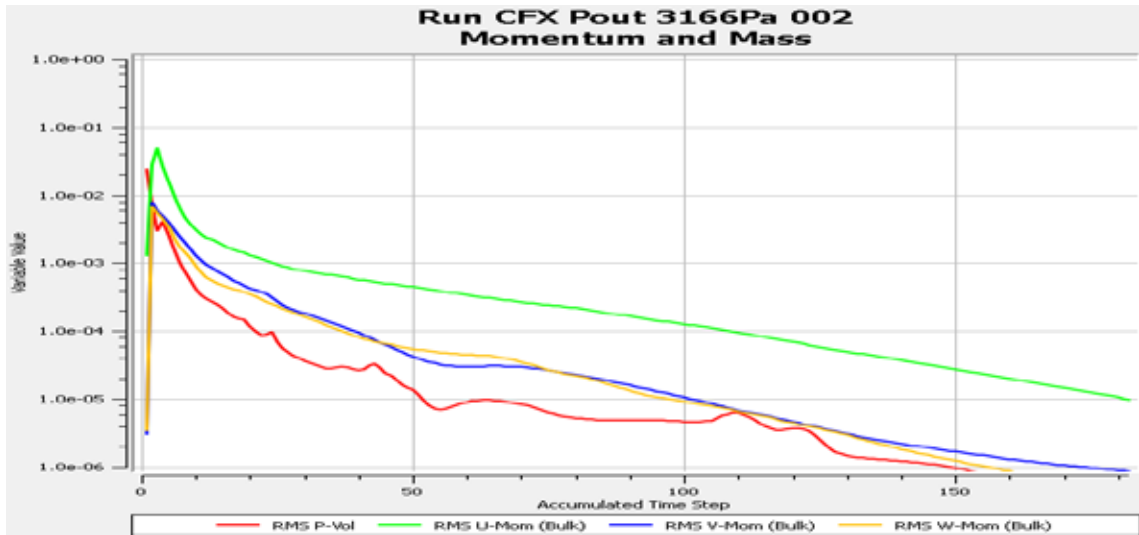


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

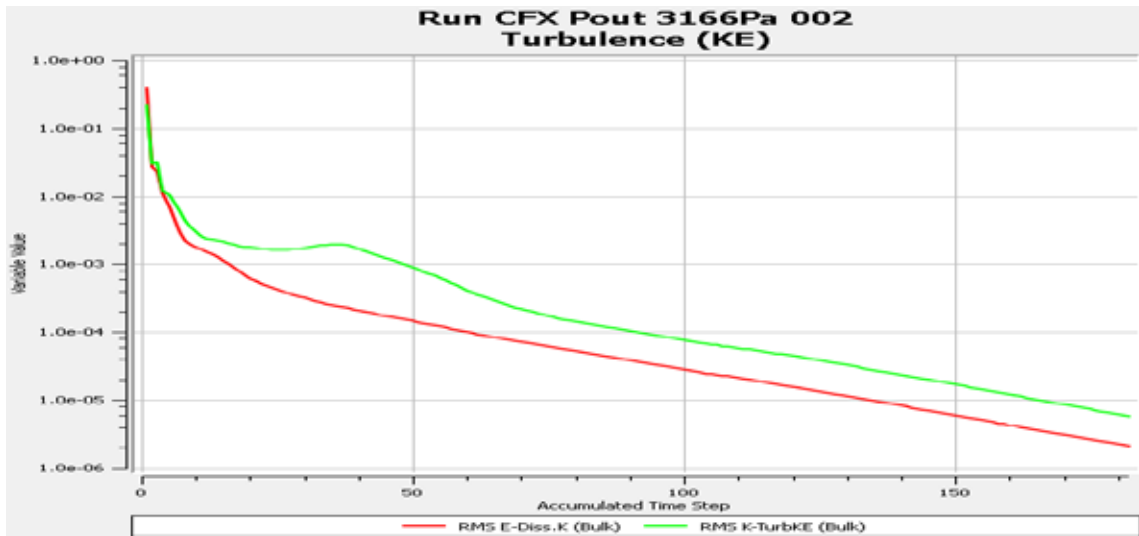


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

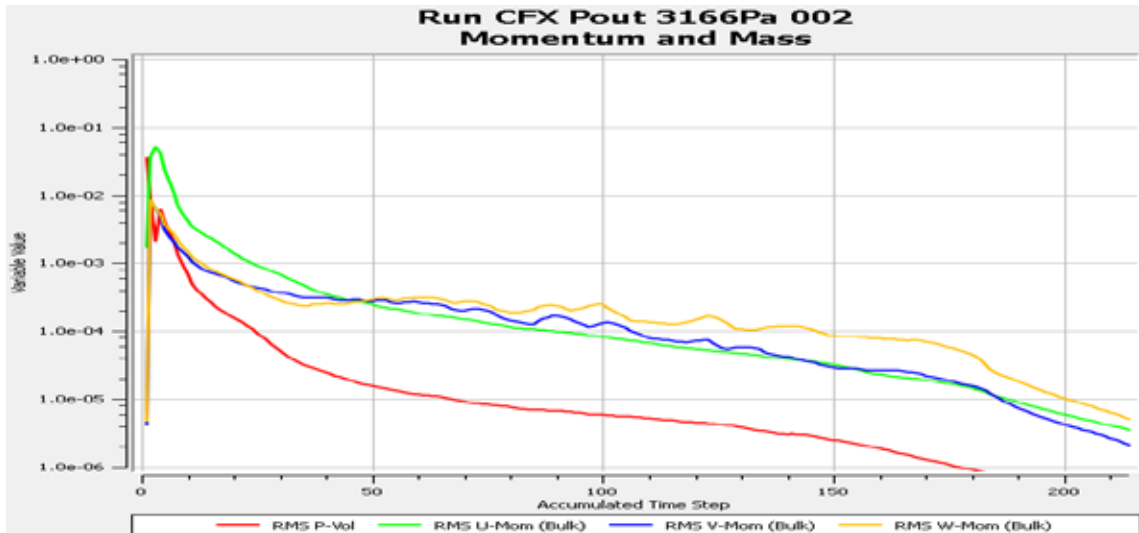


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

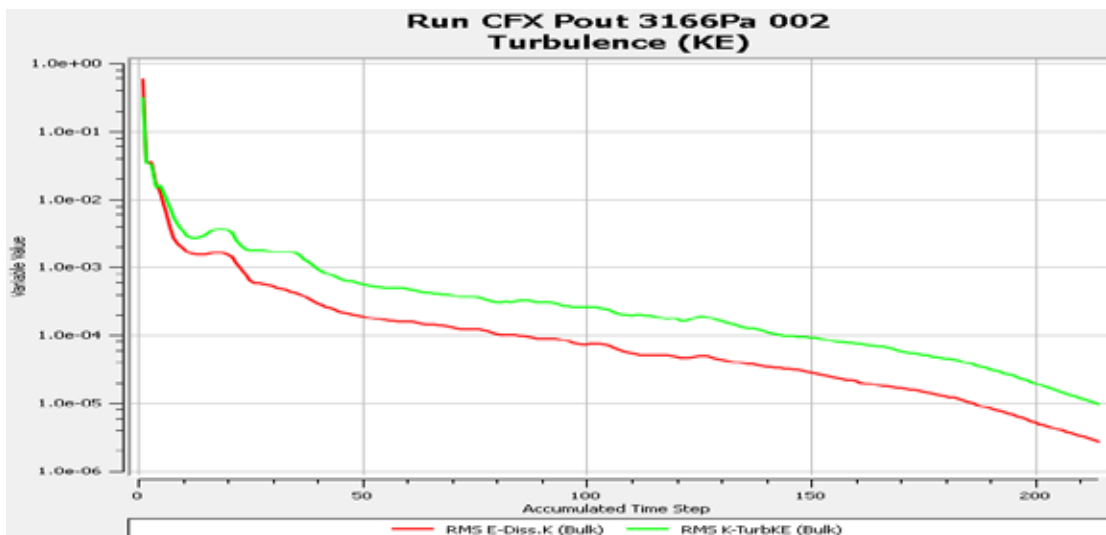


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

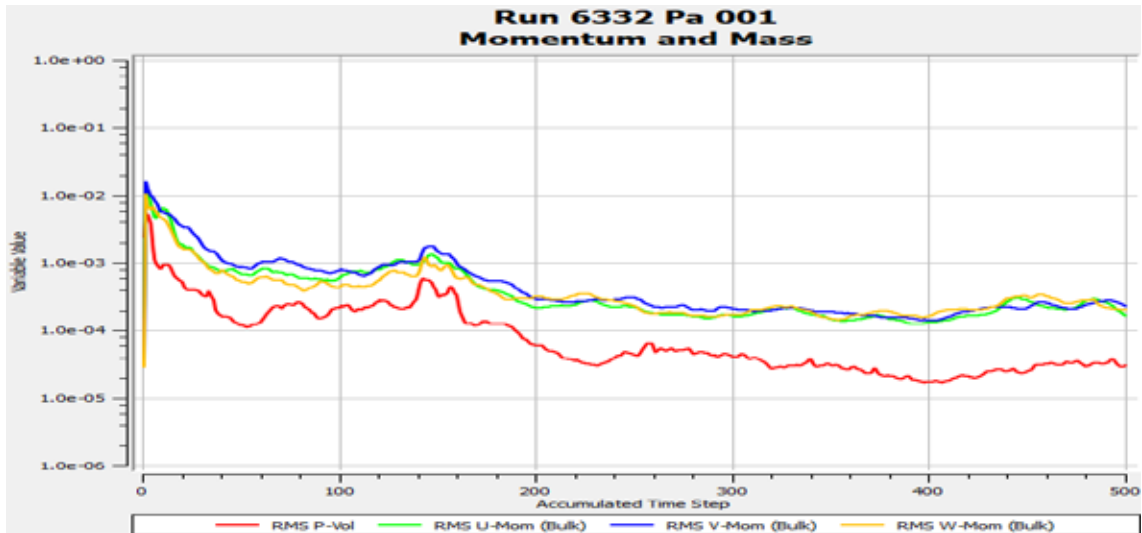


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

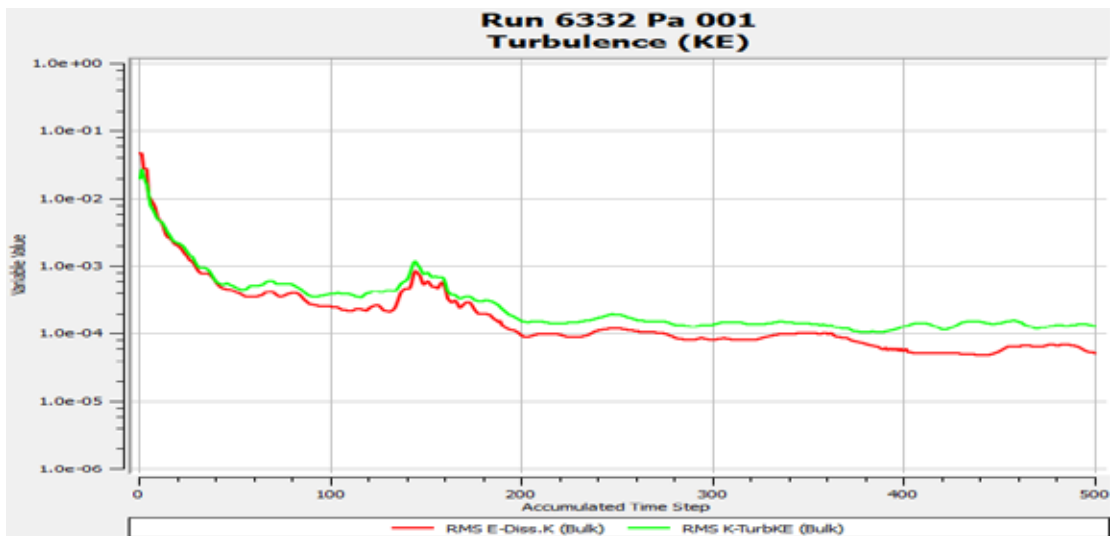
Convergencia de Simulación para válvula de Asiento Cónico

Presión de salida 6332Pa

Apertura 25%

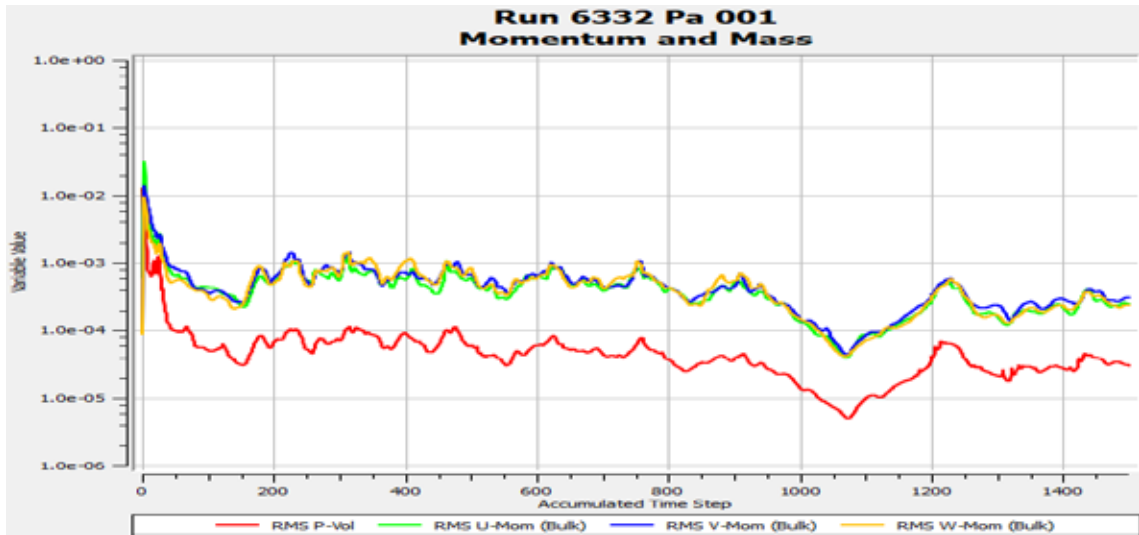


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

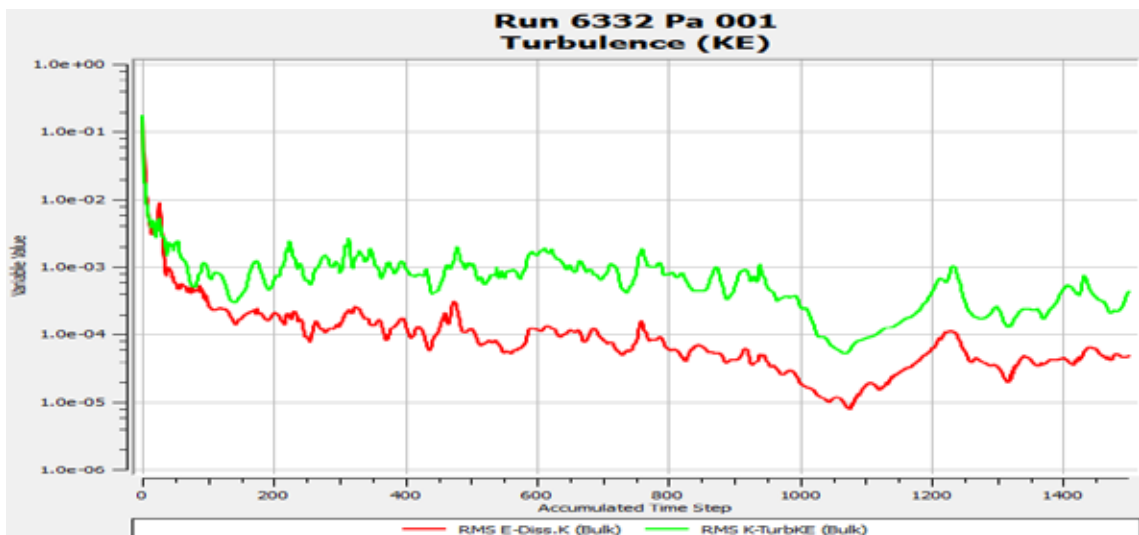


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

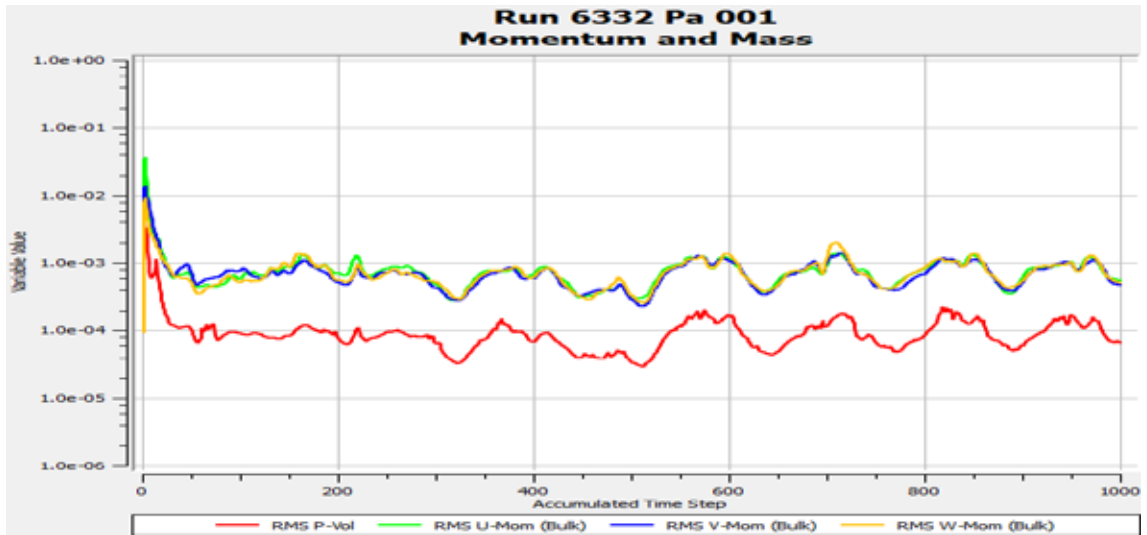


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

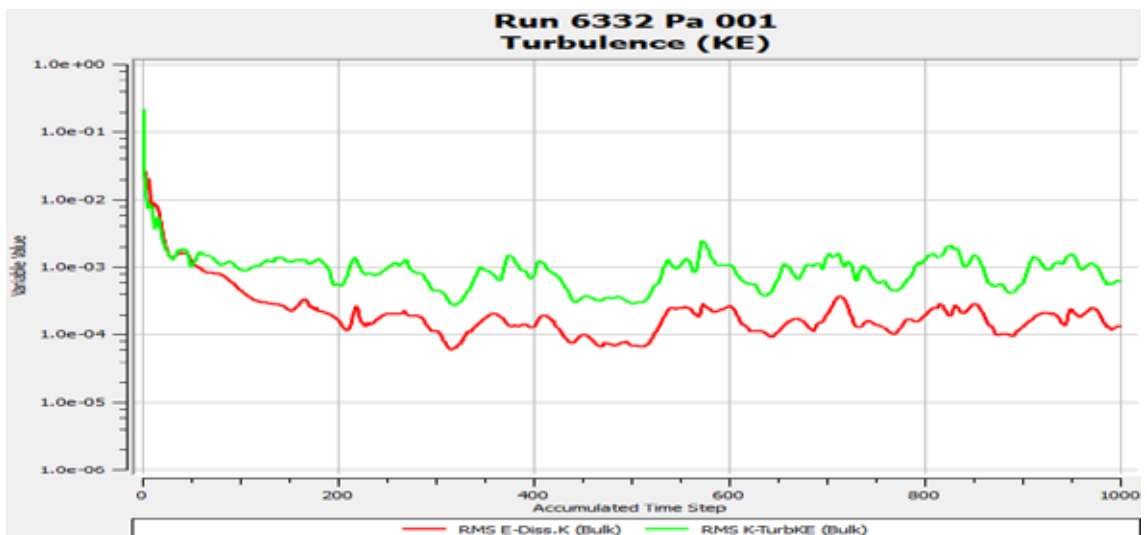


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



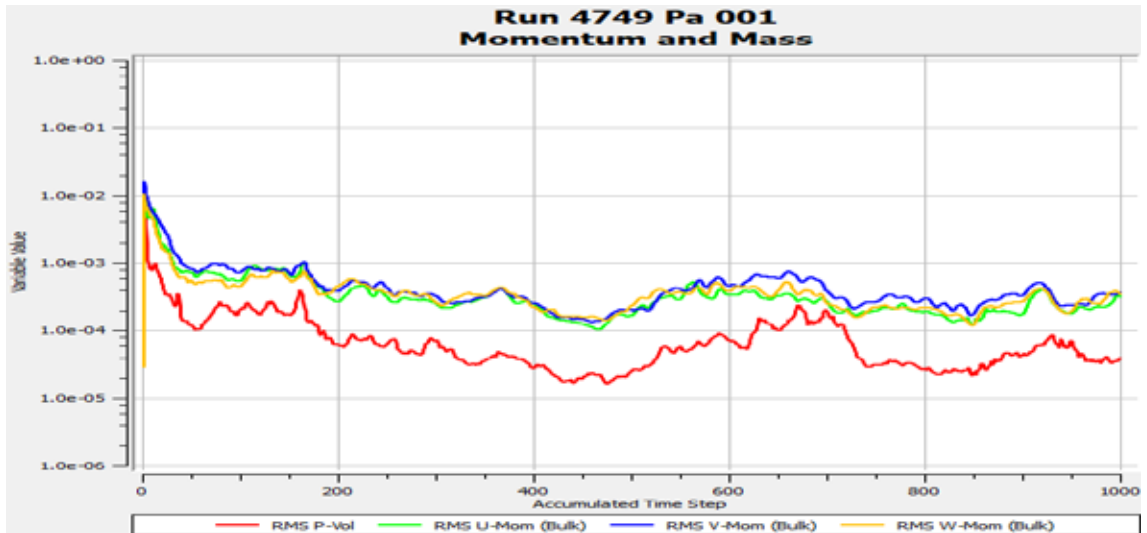
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



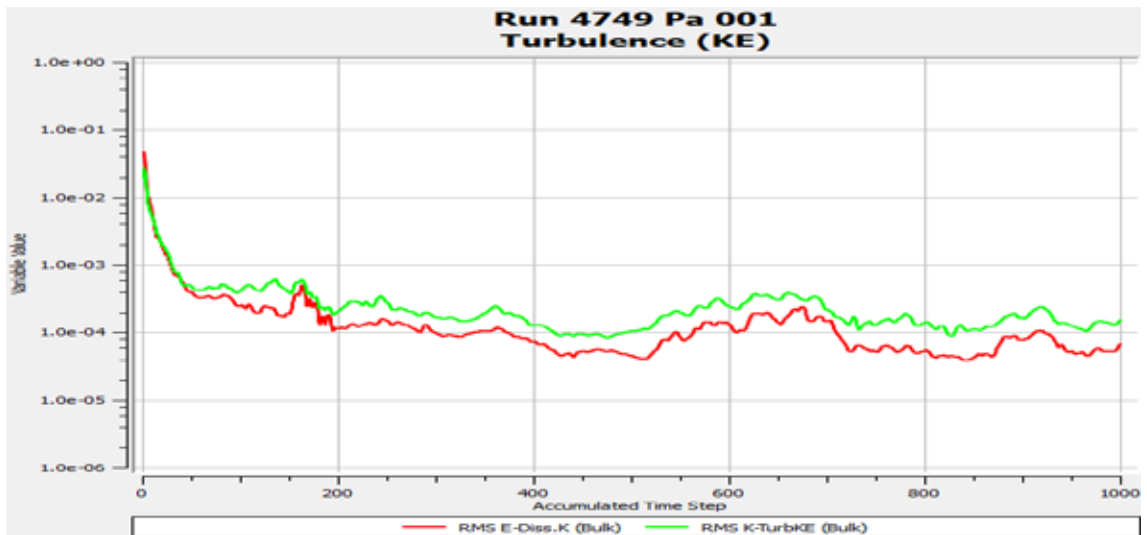
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de salida 4749Pa

Apertura 25%

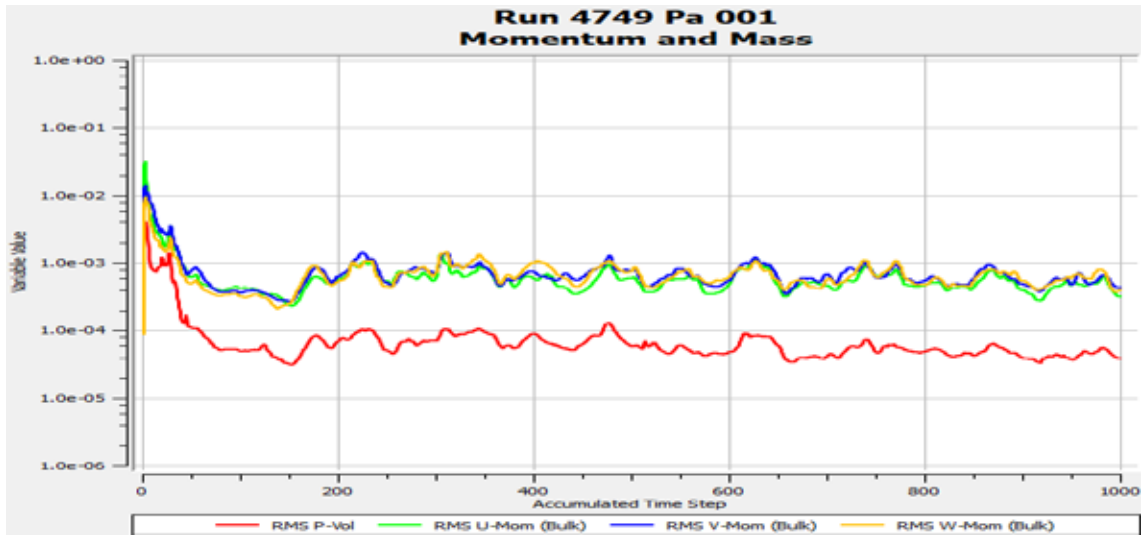


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

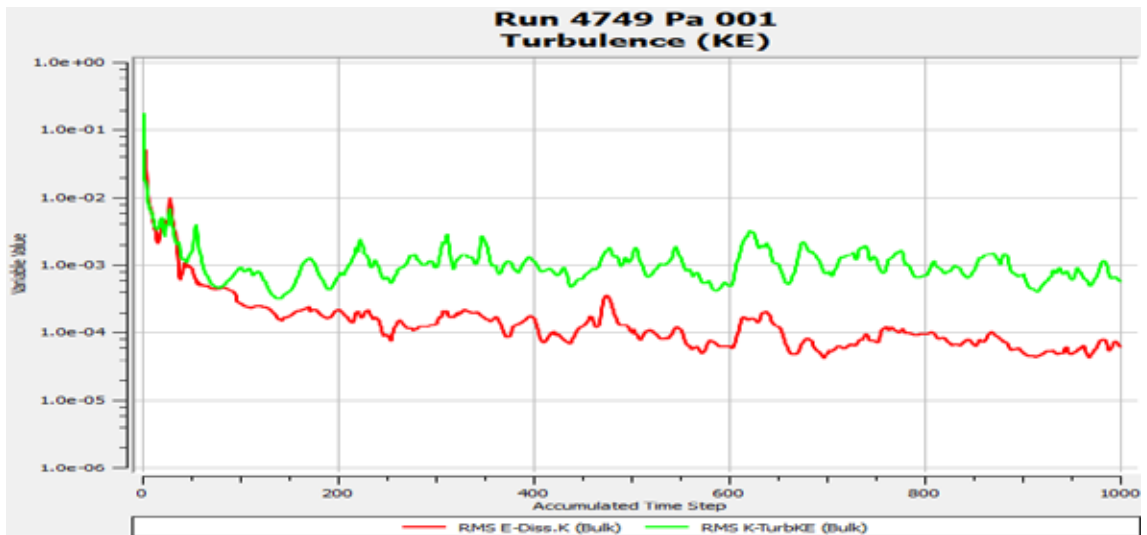


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

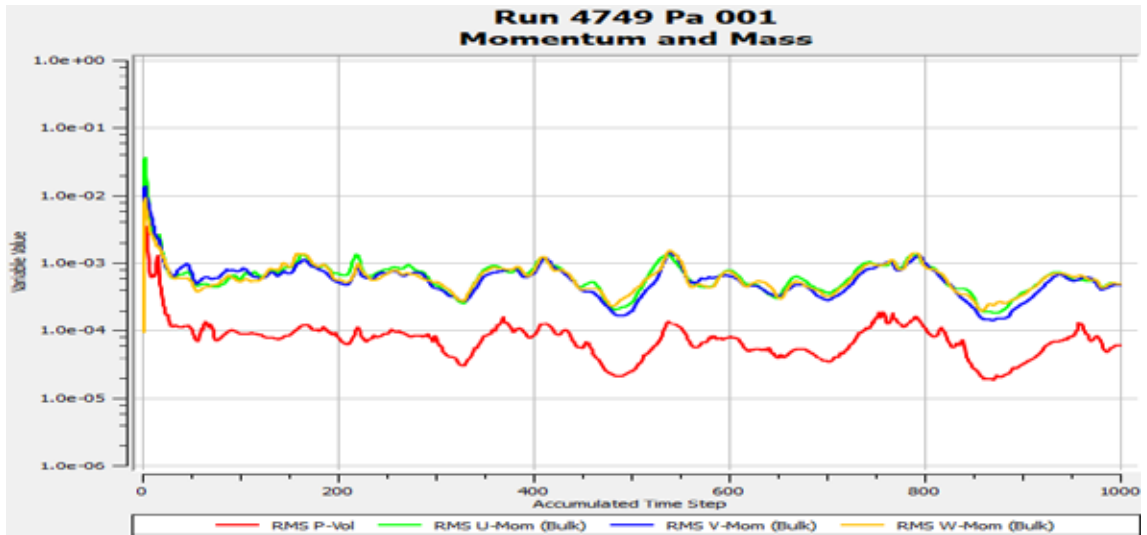


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

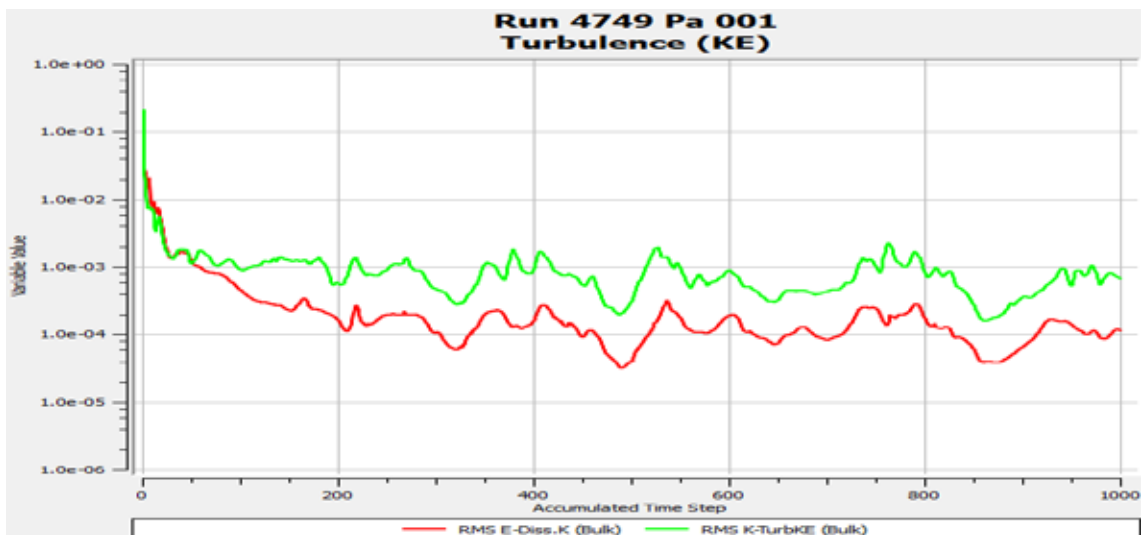


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



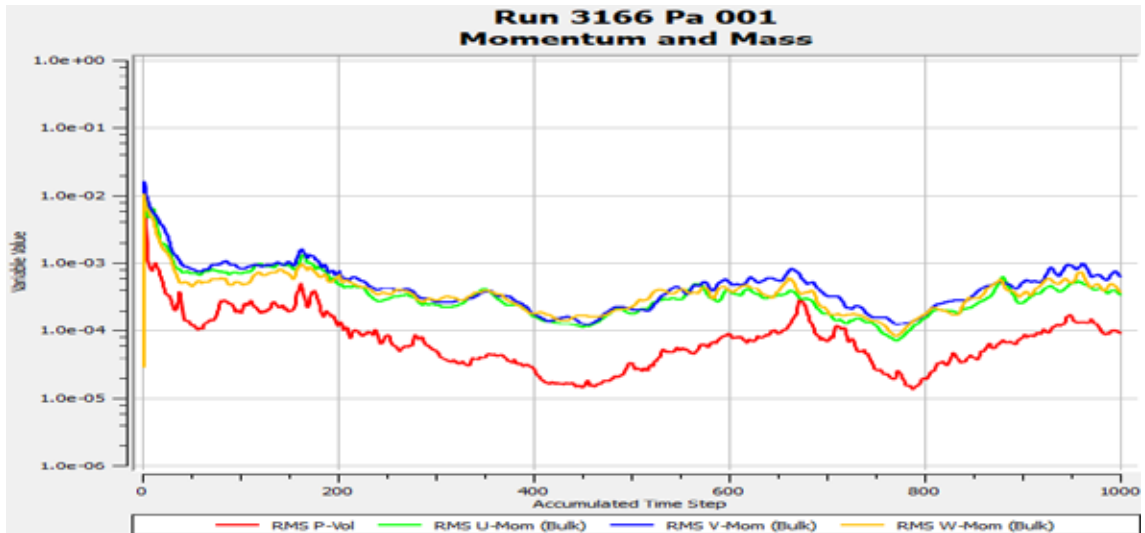
Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).



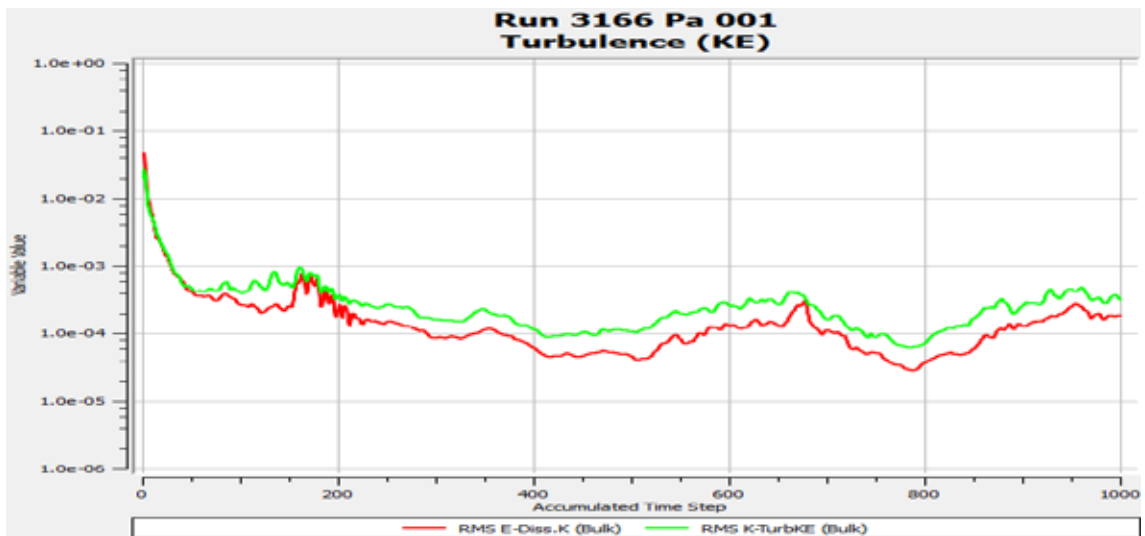
Fuente:Duran, R. y Torres, A. (2019).

Presión de salida 3166Pa

Apertura 25%

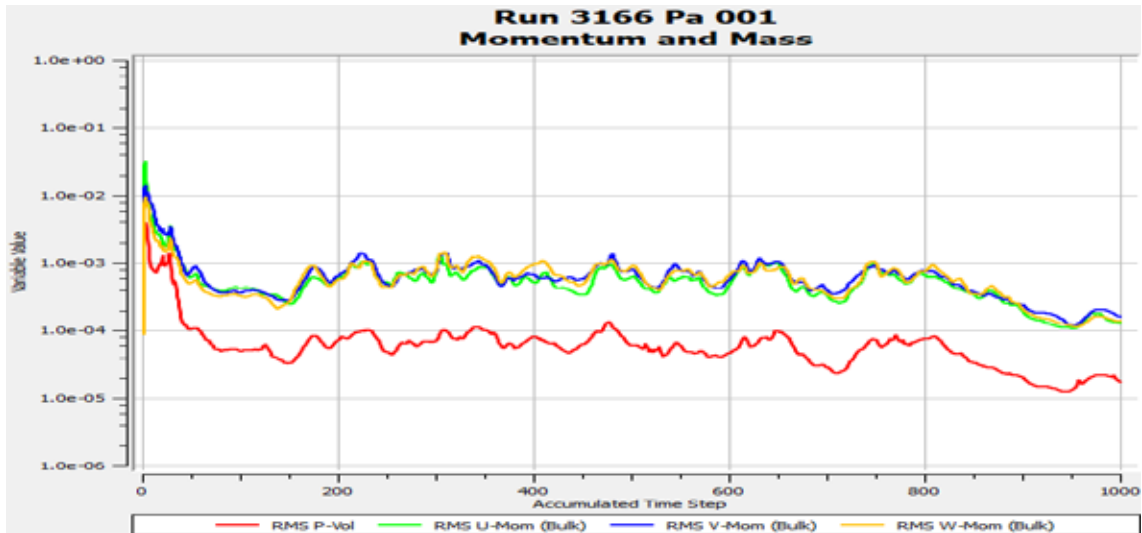


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

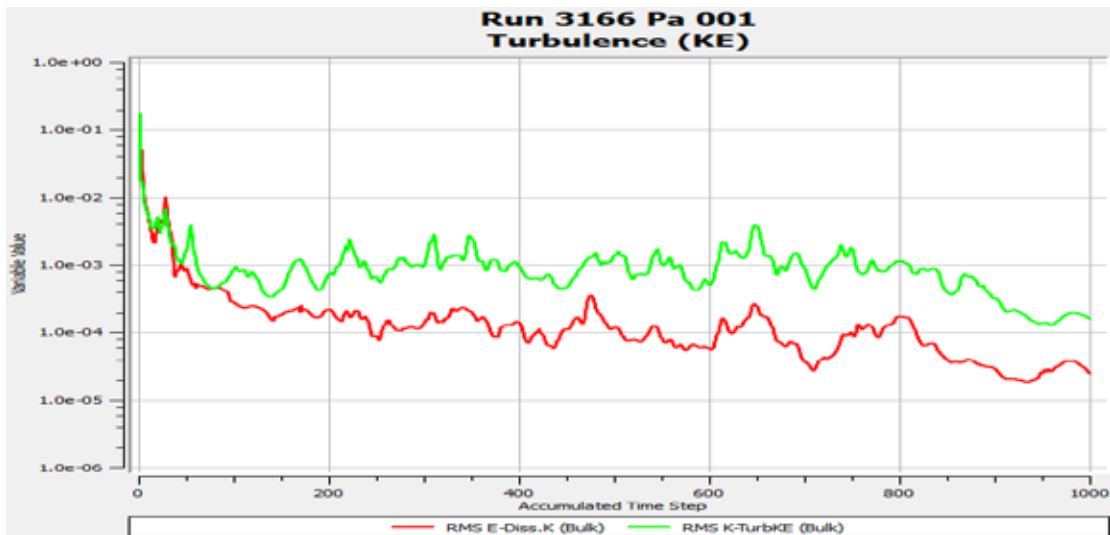


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 50%

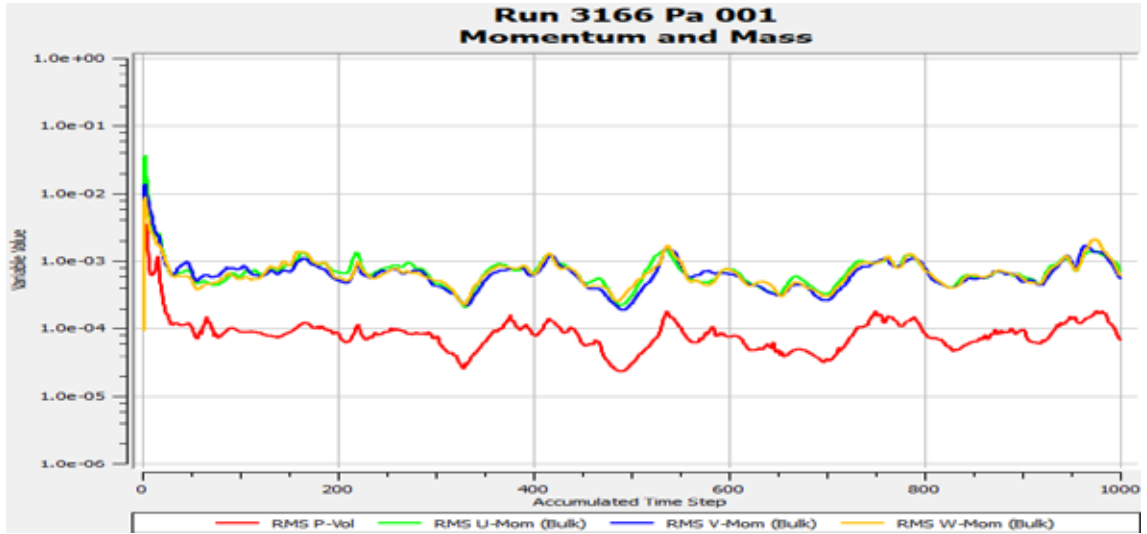


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

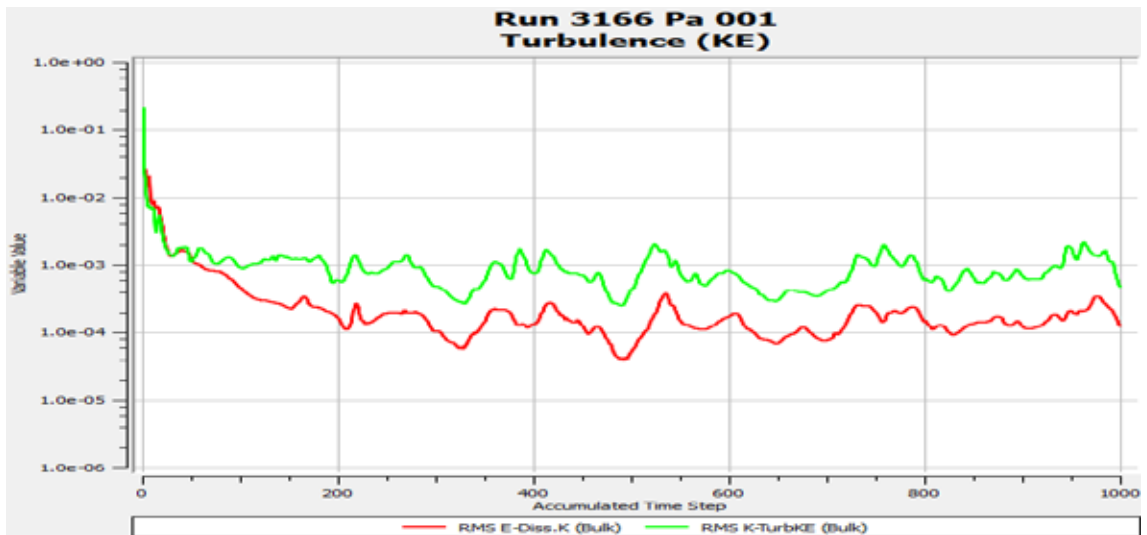


Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

Apertura 75%



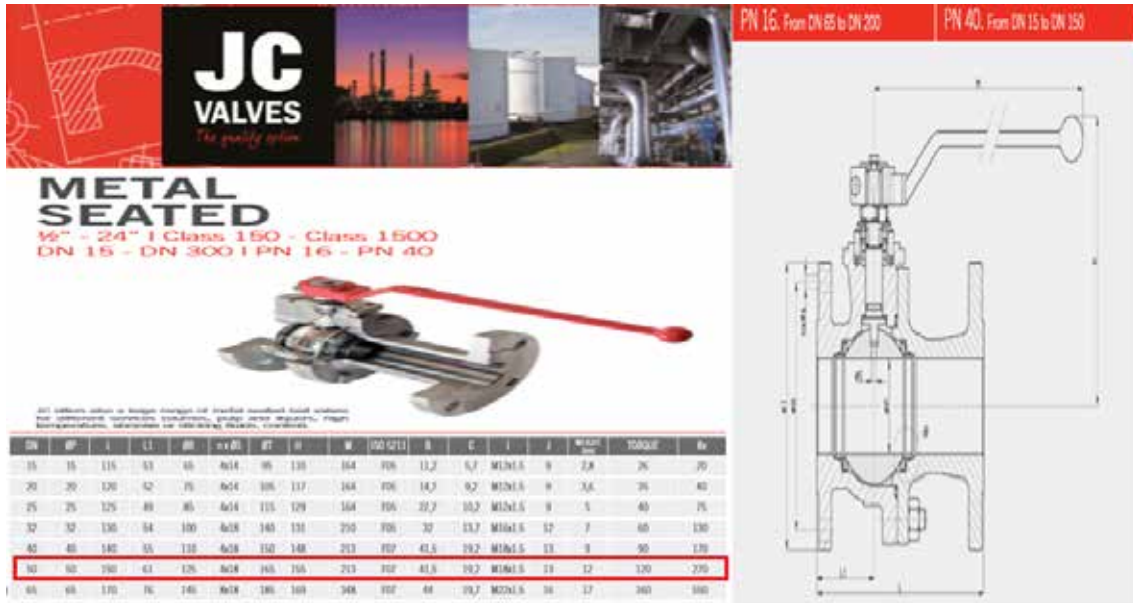
Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).



Fuente: Duran, R. y Torres, A. (2019).

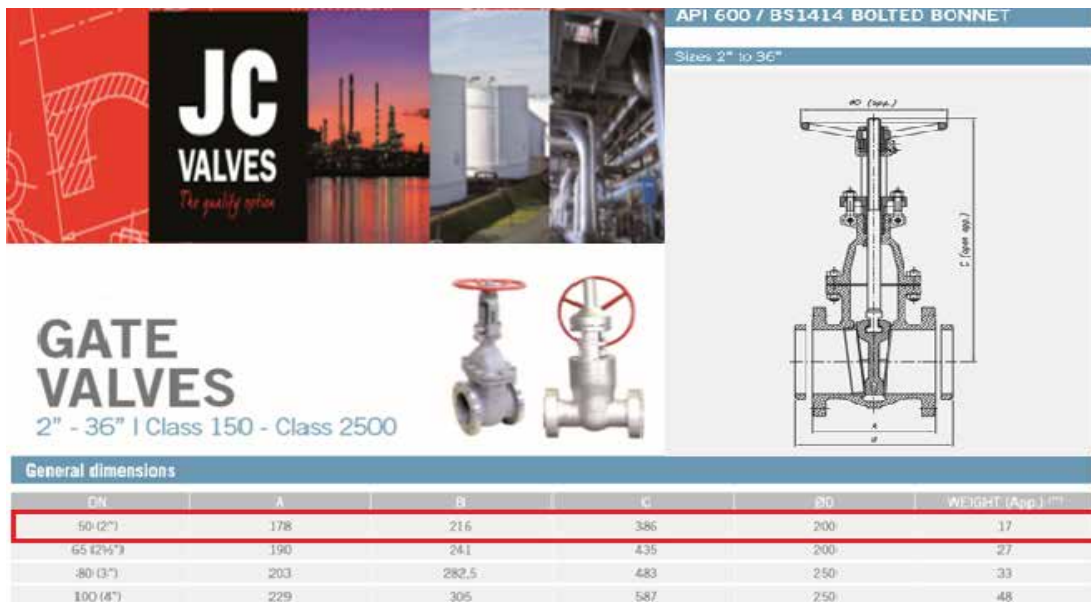
ANEXO I

Geometría de la Válvula de bola



Fuente: JC Valves (2019)

Geometría de la Válvula de Compuerta



Fuente: JC Valves (2019)

Geometría de la válvula de asiento cónico



JC VALVES
The quality option

GLOBE VALVES
2" - 16" | Class 150 - Class 2500

General dimensions

DN	A (RF / BW)	B	DC	WEIGHT (App.)
50 (2")	203	341	200	22
65 (2 1/2")	216	367	250	29
80 (3")	241	375	250	40
100 (4")	292	483	300	64

BS1873 BOLTED BONNET

Sizes 2" to 16"



Fuente: JC Valves (2019)