



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL
DEL CAMPO DE FLUJO ALREDEDOR DE
UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA.**

Autor:

Sánchez Jiménez, José Gregorio

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 INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL DEL CAMPO DE FLUJO
ALREDEDOR DE UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA.**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Sánchez Jiménez, José Gregorio

CI. 19.860.309

Tutor: Prof. Ing. Gruber A. Caraballo

San Diego, Enero 2019



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-M -006-2018-IICR

Valencia, 13 de Noviembre de 2018.

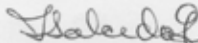
Ciudadanos:
José Sánchez
C.I:19.860.309
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2018 de fecha 13-11-2018 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL DEL CAMPO DE FLUJO ALREDEDOR DE UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA**. Presentado por usted 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 lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,




Prof. Zulay Salcedo
Decana de la Facultad de Ingeniería

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

ZS/fr



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

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Gruber A. Carballo, portador de la cédula de identidad N° 12.014.408, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el(los) ciudadano(s), Sánchez Jiménez José Gregorio, portador(es) de la cédula de identidad N° 19.860.309, (respectivamente), titulado **ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL DEL CAMPO DE FLUJO ALREDEDOR DE UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA**, Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 13 días del mes de diciembre del año dos mil dieciocho.

Firma

Ing. Gruber A. Carballo V.

C.I.: 12.014.408



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

San Diego, Enero 2019

ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado: **ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL DEL CAMPO DE FLUJO ALREDEDOR DE UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA**. Ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Prof. Gruber A. Caraballo V.

Tutor académico

Firma

Fecha

Prof.(a) Alicia de Pizzella

Tutor metodológico

Firma

Fecha

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios, por ser mí guía, por darme sabiduría para, alcanzar mis sueños y metas. como quiero expresar, sin tomar en consideración un orden específico, es a mi tutor, el Profesor Gruber A. Caraballo, qué sin su ayuda, conocimientos, consejos, guiatura y por ser incondicional en todo momento durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera agradecemos a todas las personas que intervinieron en esta investigación de manera directa e indirecta, amigos, profesores, familiares y seres queridos, quienes, en todo momento, durante el desarrollo de la investigación, estuvieron atentos y prestaron colaboración, orientación, guiatura y dirección académica

.

NOMENCLATURA

C_v	Coeficiente de flujo	-
C_d	Coeficiente de descarga	-
K	Coeficiente de pérdida	-
F_L	Factor de recuperación de presión	-
N_p	Número de fases	-
P_1	Presión absoluta aguas arriba	N/m^2
P_2	Presión absoluta aguas abajo	N/m^2
P_v	Presión de vapor absoluta del fluido	N/m^2
r	Fracción de volumen	-
S_m	Fuente de masa	Kg/m^3s
V_1	Promedio de velocidad en la entrada	m/s
V_2	Promedio de velocidad en la salida	m/s
ω	Tasa de disipación de los vórtices	rad/s
σ_c	Cavitación crítica	-
σ_i	Cavitación incipiente	-
σ	Parámetro de la cavitación	-
$r_{\alpha\beta}$	Tasa de flujo másico por unidad de volumen de la fase β a la α	Kg/s
ρ	Densidad	Kg/m^3
α, β	Fase del fluido	-
μ	Viscosidad cinemática	m^2/s
r_t	Difusividad turbulenta	Kg/ms



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

ANÁLISIS DINÁMICO COMPUTACIONAL DEL CAMPO DE FLUJO ALREDEDOR DE UNA VÁLVULA TIPO MARIPOSA.

Autor: Sánchez Jiménez, José Gregorio

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo

Fecha: Enero. 2019

RESUMEN INFORMATIVO

El presente trabajo de investigación se pretende realizar el análisis del campo de flujo alrededor de una válvula tipo mariposa, para definir su comportamiento mediante el uso de un software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). Que nos ofrece una alternativa eficiente y robusta al momento de resolver problemas de ingeniería relacionado con el campo de flujo de fluidos. Donde se busca añadir los parámetros necesarios que le permitan simular el comportamiento del fluido a través de la válvula, y observaremos como será afectada con la caída de presiones a la descarga (Salida), manteniendo una presión de entrada constante, los resultados demostraron que a medida que disminuye la presión y el ángulo de apertura observaremos la generación de vapor alrededor del obturador, sin embargo el modelo matemático basado en la ecuación Rayleigh – Plesset, nos proporcionó la base que controla la generación de vapor y condensación, que nos describe el aumento de burbujas de gas en un fluido. En la investigación se ha simulado el comportamiento de la cavitación dentro de la válvula, mediante el método de volúmenes finitos para la discretización y análisis del sistema. Ya que los resultados obtenidos mediante el método CFD son precisos y el comportamiento de las curvas características de la válvula mariposa coinciden con las curvas de comportamiento obtenidas de manera experimental.

Descriptor: Campo de flujo incompresible, válvula mariposa, dinámica de fluidos computacional (CFD).

Tabla de contenido

NOMENCLATURA	i
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	3
I EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del problema:	3
1.2 Formulación del problema:	4
1.3 Objetivos de la Investigación	4
1.3.1 Objetivo general:	4
1.3.2 Objetivos específicos:	4
1.4 Justificación del proyecto de investigación:	4
1.5 Alcance:	5
1.6 Limitaciones:	6
II MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes:	7
2.2. Base teórica	10
2.2.1 Teoría de la cavitación en válvulas.	10
2.2.2 Cuantificación de la cavitación en válvulas.	11
2.2.3 Coeficientes de válvulas.	12
2.2.4 Factor de recuperación de presión (F_L).	13
2.2.5 Límites de la cavitación en válvulas.	14

2.2.6 Cavitación incipiente (σ_i) y constante (σ_c).	14
id).	15
2.2.8 Cavitación súbita.	17
2.2.9 Modelación matemática	19
2.2.10 Leyes de la conservación	20
2.2.11 Modelación de la cavitación.	23
2.2.12 Teoría de la dinámica computacional de fluidos (CFD)	26
2.2.13 Procedimiento de solución.	27
2.2.14 Generación e independencia de la malla.	29
2.2.15 Verificación de la geometría	30
2.2.16 Calidad de la malla.	31
2.2.17 Criterio de convergencia de la raíz media promedio.	33
2.3 Glosario de términos	33
III MARCO METODOLÓGICO	37
3.1 Tipo de Investigación	37
3.2 Diseño de investigación	37
3.3 Nivel de la investigación	38
3.4 Población y muestra	39
3.4.1 Población	39
3.4.2 Muestra	39
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos observación directa defino y cual uso.	39
3.6 Fases de la Investigación	40

IV RESULTADOS	43
4.1 Revisión de los documentos bibliográficos acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una válvula hidráulica tipo mariposa.	43
4.2 Selección de una válvula real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD)	44
4.2.1 Dibujo de la válvula.	44
4.2.2 Importación de la geometría	45
4.3 Simulación el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)	46
4.3.1 Selección de los modelos matemáticos.	46
4.3.2 Verificación de la geometría y mallado	47
4.3.3 Generación del dominio	50
4.3.4 Configuración de la herramienta de cálculo	54
4.4 Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático	56
4.4.1 Obtención de los resultados	56
4.4.2 Convergencia de las simulaciones	56
4.4.3 Resultados del pots-procesamiento	59
4.4.5 Visualización de resultados	62
4.5 Comportamiento de las líneas de flujo y de vapor de agua en el dominio fluidizado.	73
4.5.1 Comportamiento de la generación de vapor en la trayectoria del flujo de fluido.	74

Fuente: Sánchez (2018)	75
4.5.2 Comportamiento de las curvas velocidad y presión del campo de flujo en función de la apertura del obturador de la válvula.	75
4.6 Análisis de resultados.	83
4.6.1. Generación del dominio.	83
4.6.2. Selección del modelo de turbulencia.	84
4.6.3. Convergencia de la simulación numérica.	84
4.6.4. Resultados del post-procesamiento.	84
CONCLUSIONES	85
APÉNDICE I	88
ANEXO I	90

ÍNDICE DE FIGURAS

1: Evaluación de la cavitación crítica y la cavitación incipiente. -----	16
2: Líneas hidráulicas por grado de cavitación. -----	18
3: Dominio Computacional. -----	27
4: Ortogonalidad de la malla “Mesh Orthogonality” -----	31
5: Factor de expansión de la malla “Mesh Expansion Factor” -----	32
6: Aspecto del radio de la malla “Mesh Aspect Ratio” -----	32
7: Dimensionamiento de la válvula mariposa. -----	45
8: Dimensionamiento de la válvula mariposa (CFD). -----	46
9: Importación del diseño en el software CFX. -----	47
10: Configuración del mallado. -----	49
11: Corte longitudinal de la geometría. -----	50
12: Configuración de la condición de borde como entrada -----	52
13: Configuración de la condición de borde como de salida. -----	53
14: Configuración del dominio. -----	54
15: Configuración de la herramienta “solve”. -----	55
16: Parámetros de trabajo del dominio de la válvula. -----	55
17: Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para $P= 3166$ Pa en la malla que corresponde al ángulo de apertura 30° -----	57
18: Representación gráfica de convergencia del modelo de Turbulencia SST para $P=3166$ Pa en la malla que corresponde al ángulo de apertura 30° . -----	58
19: Coeficiente de descarga (C_d) vs Evaluación de cavitación (). -----	61
20: Coeficiente de flujo (C_v) vs Evaluación de cavitación (). -----	62
21: Fracción de Volumen de vapor sobre el plano de simetría a 15° -----	63
22: Presión absoluta sobre el plano de simetría a 15° de apertura -----	64
23: Perfil de Velocidad sobre el plano de simetría a 15° de apertura -----	65
24: Fracción de Vapor sobre el plano de simetría a 30° de apertura -----	66

25: Presión Absoluta sobre el plano de simetría a 30° de apertura-----	67
26: Perfil de velocidad sobre el plano de simetría a 30° de apertur -----	68
27: Volumen fracción sobre el plano de simetría a 45° de apertura. -----	69
28: Presión absoluta sobre el plano de simetría a 45° de apertura. -----	69
29: Perfil de velocidad sobre el plano de simetría a 45° de apertur -----	70
30: Volumen fracción sobre el plano de simetría a 60° de apertura-----	71
31: Presión absoluta sobre el plano de simetría a 60° de apertura-----	72
32: Perfil de velocidad sobre el plano de simetría a 60° de apertur -----	73
33: Comportamiento de las líneas de flujo y generación del vapor de agua.-----	74
34: Generación de vapor alrededor del obturador en función de la fracción de vapor y el ángulo de apertura del obturador. -----	75
35: Comportamiento de la velocidad a 15°. -----	76
36: Comportamiento de la presión a 15°. -----	77
37: Comportamiento de la velocidad a 30°. -----	78
38: Comportamiento de la presión a 30°. -----	79
39: Comportamiento de la velocidad a 45°. -----	80
40: Comportamiento de la presión a 45°. -----	81
41: Comportamiento de la velocidad a 60°. -----	82
42: Comportamiento de la presión a 60°. -----	83

ÍNDICE DE TABLAS

1: Características geométricas de una válvula mariposa.....	45
2: Parámetros obtenidos de la verificación de la geometría.....	48
3: Parámetros establecidos para el pre-simulador.....	51
4: Configuración de las condición de entrada.....	52
5: Configuración de las condiciones de salida.....	53
6: Configuración del dominio.....	54
7: Valores residuales RMS de la convergencia para apertura 30°.....	58
8: Resultados del post-procesamiento de la malla de 30°.....	59
9: Resultados del post-procesamiento para la malla de 30°.....	60
10: Valores residuales RMS a 15°.....	88
11: Valores residuales RMS a 45°.....	88
12: Valores residuales RMS a 60°.....	88
13: Tabla de resultados post-procesamiento para la malla de 15°.....	89
14: Tabla de resultados post-procesamiento para la malla de 45°.....	89
15: Tabla de resultados post-procesamiento para la malla de 60°.....	89

INTRODUCCIÓN

Los métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos son: la experimentación y el cálculo. El primero conlleva, por lo general, la construcción de modelos a escala que son probados en bancos de ensayo u otras instalaciones adecuadas; mientras que el segundo, implica la resolución de ecuaciones diferenciales complejas que en casi todas las ocasiones resultan en sistemas no cerrados que se resuelven por medio de ecuaciones potenciales conocidas como series, cuyos términos son infinitos y se deben hacer aproximaciones que muchas veces resultan en errores de diseño o disminución de la eficiencia de procesos y equipos. Con el auge de la computación se ha podido aplicar métodos numéricos para resolver los problemas complejos de la mecánica de fluidos y por ende disminuir la inversión en bancos de prueba, a ésta metodología se le denomina técnica de aproximación numérica en dinámica de fluidos o Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

La presente investigación tiene por objeto el estudio de la dinámica del fenómeno de cavitación alrededor de una válvula de compuerta del tipo mariposa, mediante la implementación de la Dinámica de Fluidos Computacional, con la finalidad de describir el campo de flujo y las distintas variables que lo componen. Para ello la se ha estructurado de la siguiente forma:

En el **capítulo I** se explica todo lo relacionado al planteamiento y formulación del problema, además de los objetivos a alcanzar en el proyecto, así como también las limitaciones que se presentan al momento buscar la solución del problema.

Luego en el **capítulo II** se hace referencia a los antecedentes consultados, así como también, a toda terminología y conceptos necesarios que sirven de base teórica para el desarrollo del estudio.

Por su parte el **capítulo III** consta del tipo, nivel y el diseño de la investigación, así como de las distintas fases metodológicas a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

Y por último en el **capítulo IV** se obtienen los resultados para su posterior análisis, haciendo énfasis en el cumplimiento de los objetivos.

La investigación aquí presentada, está estructurada de tal manera que el lector pueda ir adquiriendo los conocimientos básicos que le permitirán entender la utilidad y los grandes beneficios que nos ofrece esta gran herramienta a usar. Sin embargo, cabe destacar que, si el lector es lo suficientemente conocedor del tema, perfectamente puede obviar los capítulos que contengan información que considere ya conocida, y continuar con los aspectos que crea interesantes sin que se pierda la linealidad o coherencia de la información que se desea mostrar.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema:

Para poder realizar la instalación de una válvula mariposa en un sistema de tuberías es necesario conocer el comportamiento hidráulico de la misma, reflejado principalmente por la caída de presión a través del componente. Adicionalmente, en la instalación de válvulas al ingreso de bombas o turbinas, es necesario conocer el perfil de velocidades del flujo a través de la válvula y si existe el riesgo de cavitación por el paso del flujo, lo cual puede producir inestabilidad en los equipos aguas abajo y deterioro de la válvula por efecto de la erosión.

Para una válvula mariposa de la cual no se conoce su comportamiento hidráulico es necesario considerar dos problemas. El primero consiste en averiguar de forma cualitativa y cuantitativa cómo es la caída de presión a través de la válvula, cómo es el perfil de velocidades a través de la misma y si existe o no el riesgo de cavitación. El segundo problema consiste en analizar la válvula y si la situación amerita, realizar los cambios para mejorar su comportamiento hidráulico.

Se pueden aplicar dos métodos para resolver esos problemas: la experimentación (sobre modelos físicos del objeto de estudio) y el cálculo (ya sea analítico ó simulación mediante el uso de métodos numéricos). La metodología basada en la experimentación es la más confiable en cuanto a los resultados, ya que consiste en realizar ensayos reales sobre un modelo físico de la válvula. Sin embargo, el problema radica en la fuerte inversión de tiempo y dinero. Además, sólo se obtiene información en algunos puntos del sistema.

Por otro lado, la metodología del cálculo por métodos analíticos es la más deseable ya que permite obtener información en cualquier punto del sistema analizado debido a que se intenta resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del fluido. Sin embargo, esta metodología se descarta debido a su complejidad y sólo se aplica para casos muy sencillos. El otro enfoque es la

metodología del cálculo por métodos numéricos la cual consiste en aproximar las ecuaciones del método analítico en un sistema de ecuaciones algebraicas que puede ser resuelto mediante un computador. Esta metodología, a pesar de requerir una comparación con resultados experimentales, tiene la gran ventaja de ofrecer mayor información que un experimento y permitir modificaciones rápidas de las condiciones del sistema con un tiempo y costo de ejecución por debajo de lo requerido para una experimentación.

1.2 Formulación del problema:

¿Cómo se podría describir las variables que conforman el campo de flujo a través de una válvula hidráulica tipo mariposa y analizar su comportamiento según el perfil de presiones, velocidad y posibilidad de cavitación en el desempeño de la misma?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo general:

Analizar mediante la dinámica de fluidos computacional el campo de flujo alrededor de una válvula tipo mariposa.

1.3.2 Objetivos específicos:

Investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una válvula hidráulica tipo mariposa.

Identificar las características geométricas de una válvula con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD).

Simular el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Evaluar los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático.

1.4 Justificación del proyecto de investigación:

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) tiene como objetivo la simulación del flujo de fluidos y los procesos de transferencia de calor, esto con el fin de simplificar el estudio de diversos fenómenos que

analíticamente serían muy complejos y difíciles de desarrollar. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía de un fluido.

Hoy en día, con las enormes posibilidades que nos brindan las computadoras y el desarrollo de los métodos numéricos, la CFD se está convirtiendo en una herramienta muy práctica y eficiente para el análisis de situaciones en las que están involucrados fluidos, por consiguiente, es una inestimable herramienta de análisis y diseño. Uno de esos casos es el estudio de la dinámica del flujo de fluidos a través de una válvula de control del tipo mariposa, donde la construcción de un banco de pruebas y posterior ensayo acarrearían importantes costos al proyecto y en consecuencia mayor uso de recursos materiales y humano. Por lo tanto, es preferible realizar una simulación numérica del campo de flujo alrededor de dicho accesorio bajo un ambiente controlado y virtual, donde se pueda evaluar el comportamiento de las variables del fluido cuando se encuentra sometido a gradientes de presiones donde se puede producir el fenómeno de cavitación, lo cual podría ocasionar daños estructurales en la superficie de la válvula.

Por último, se desea minimizar estos inconvenientes, y para ello se requiere conocer detalladamente las características del flujo y así mejorar la geometría interna de la misma y su diseño.

1.5 Alcance:

Esta investigación solo se encargará del estudio de la variación de las propiedades del campo de flujo a través de una válvula hidráulica tipo mariposa, esto en virtud de que, para el tiempo establecido, no se pretende indagar en otros tipos de válvulas y consideraciones de diseño novedosas. Tampoco se indagará en los cambios que puedan sufrir las propiedades por la presencia de elementos externos, como lo son el golpe de ariete y las propiedades del fluido, por lo que, en todo momento, se considerará flujo estacionario sin inestabilidades hidrodinámicas, interacciones de trabajo o cambios de energía potencial. El estudio y la simulación numérica solo serán referidas para un modelo matemático específico, así como los resultados

obtenidos solo serán aplicables para campos de flujo unidimensional. Los resultados obtenidos serán arrojados en forma de datos y mediante el uso de gráficos numérico-experimentales de las variables que describen el fenómeno.

1.6 Limitaciones:

El presente trabajo de investigación presentara las siguientes limitaciones:

La ausencia de equipos con una alta capacidad de procesamientos que permitan detallar un estudio detallado de una válvula tipo mariposa.

Pocas fuentes bibliográficas referidas al tema de cavitación en las válvulas

Actualmente no se cuenta con un banco de ensayo, en donde se estudie la cavitación en válvulas y con el cual se podrían hacer validaciones de los resultados del estudio.

Cantidad de tiempo que se invierte haciendo las simulaciones, lo cual se realizan de manera que se puedan culminar en los tiempos establecidos para elaborar la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes:

Las investigaciones en el análisis de simulación numérica relacionadas con el estudio de la cavitación en válvula son de data reciente y son escasos los investigadores que se han abocado a este objeto de estudio, muchos estudios realizados hasta ahora se basan en el comportamiento de dicha válvula en una aplicación industrial o en un entorno determinado.

Villarroel Quiende et al. (2015), en su trabajo de grado titulado: **Simulación numérica de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa**, presentado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), para optar al título de Magister en Ingeniería Mecánica y en la cual destaca que las válvulas mariposa son componentes muy utilizados para el transporte de fluidos a través de tuberías. Dentro de estas válvulas, destacan las válvulas mariposas de doble excentricidad por tener ciertas ventajas como por ejemplo la reducción del desgaste de su sellado en comparación con las válvulas mariposas clásicas. Sin embargo, su asimetría origina un comportamiento más crítico en cuanto a las características hidráulicas del flujo, como son: la pérdida de carga, la distorsión del perfil de velocidades y el riesgo a la cavitación. Como es usual utilizar estas válvulas para control on-off de flujos, se desean bajas pérdidas de carga en su posición totalmente abierta. Cuando estas válvulas se sitúan directamente en el ingreso de turbomáquinas, es importante conocer el grado de distorsión del perfil de velocidades que entra en la máquina ya que esto modifica los ángulos de ataque del flujo con los álabes y con ello el punto de operación. Y si se opera con presiones bajas también se debe considerar el riesgo de cavitación en partes de la válvula donde se eleve localmente la velocidad. Son estas tres características las que se estudiarán en una válvula mariposa previamente diseñada en la PUCP, con el fin de mejorar la geometría original y con ello su

comportamiento hidráulico. Idealmente, se deben realizar ensayos experimentales para conocer el comportamiento hidráulico, pero estos métodos generalmente resultan muy costosos. Una alternativa utilizada hoy en día para la optimización de productos es el estudio computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) el cual tiene ciertas ventajas, ya que entrega la información de todos los puntos del dominio y permite realizar cambios en la geometría o en el flujo de forma rápida y menos costosa. En el presente trabajo se realiza el análisis CFD de una válvula mariposa de doble excentricidad con un diámetro nominal de 610mm, en posición completamente abierta con un caudal aproximado de agua de 1 m³/s a 10°C lo que implica una velocidad media en la tubería de aproximadamente 3.5 m/s. Para ello se utilizó el programa ANSYS CFX 14.0 y se empleó el modelo de turbulencia SST. Luego, se realizó una modificación del diseño original para obtener un diseño alternativo el cual es incluso un 2% más ligero. Lo más importante fue que se consiguió una reducción del 38.3% del coeficiente de pérdidas del diseño original y se aumentó un 40.4% la resistencia a la cavitación del diseño original. Sin embargo, al igual que en el diseño original, el flujo recién comienza a recuperar la forma que tenía antes de ingresar a la válvula después de 14 diámetros nominales aguas abajo de la misma.

Debido a la no linealidad de las ecuaciones que definen el modelo del flujo bifásico a través de la válvula, la simulación en el ambiente ANSYS CFX 14.0, el uso del modelo de turbulencia definido como: transporte del esfuerzo de corte (SST por sus siglas en inglés) y tomando en cuenta los aspectos que más afectan al campo de flujo, dicho trabajo representó una buena guía para la realización de la presente investigación, y se relacionó con éste en primer lugar porque se trata del estudio de una válvula tipo mariposa, y en segundo lugar porque establece una metodología para la realización de las simulaciones.

Asi mismo, Caiza L. et al. (2018). En su artículo titulado: **Análisis numérico de la turbulencia de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa**, publicado en la revista caribeña de ciencias, realizan la simulación numérica de un flujo turbulento a través de una válvula tipo mariposa es una técnica útil para

investigar los fenómenos físicos del campo de flujo. Se realizó un análisis numérico bidimensional de un flujo turbulento de agua líquida en una válvula de mariposa utilizando ANSYS FLUENT, que resuelve las ecuaciones diferenciales en método de volúmenes finitos (FEM por sus siglas en inglés). Se investigó sobre las características del flujo a través de la válvula en diferentes porcentajes de abertura del disco con una velocidad de entrada uniforme. Se realizó una independencia de malla basado en la velocidad para así elegir correctamente el tipo de malla que se utilizó en todo el análisis. Esta simulación proporciona los contornos de velocidad y energía cinética de turbulencia especialmente en la sección donde se encuentra ubicada la válvula tipo mariposa. Los resultados del análisis bidimensional pueden ser útiles para el diseño de la válvula.

Este antecedente se encuentra estrechamente vinculado con la investigación debido a que se realizó una simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD) con el método de elementos finitos (FEM), la metodología para su realización fue de gran utilidad, sobre todo en la caracterización de las propiedades del campo de flujo, y posteriormente el establecimiento de las condiciones de borde del mismo., aunque su mayor relación con la presente investigación es que se usó el mismo ambiente de trabajo o workbench de la empresa ANSYS .

Por último, Benítez R. y Luna E., (2009). **Análisis de la cavitación en válvulas utilizando técnicas de aproximación numérica.** Presentado en la universidad de Carabobo, en la facultad de ingeniería, situada en la ciudad de Valencia, Venezuela. Donde el estudio de la cavitación en válvula requiere de la construcción de bancos de ensayos costosos, los cuales se encuentran limitados por la gran variedad y las amplias condiciones de trabajo a las cuales están sometidas las válvulas en general. La dinámica de fluidos computacional (CFD) ofrece una alternativa eficiente y robusta al momento de resolver problemas de ingeniería relacionado con el flujo de fluidos, que en conjunto con validaciones experimentales posibilitan la predicción de fenómenos físicos con una excelente precisión En este

trabajo de investigación se ha simulado el comportamiento de la cavitación dentro de las válvulas tipo mariposa empleando la dinámica de fluidos computacional, mediante el método de volúmenes finitos para la discretización y análisis del sistema. Los resultados obtenidos mediante el método CFD son precisos y el comportamiento de las curvas características de la válvula mariposa coincide con las curvas de comportamiento obtenidas de manera experimental.

Este último antecedente consultado, representa la base de ésta investigación, pero no se consideró el comportamiento de las líneas de flujo y el vapor de agua generado alrededor del obturador de la válvula, de esta manera sólo sirvió como guía para el procedimiento de cálculo y adecuación de la herramienta computacional con base en el uso del ANSYS Workbench CFX .

2.2. Base teórica

De acuerdo con Arias (2006), “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). Por lo tanto, la correcta realización de las bases teóricas permitirá no solo obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados

2.2.1 Teoría de la cavitación en válvulas.

La cavitación es el rápido proceso de vaporización y condensación de un líquido. Cuando la vaporización se produce a presión constante, debido a un aumento de la temperatura, el proceso se conoce como un punto de ebullición. Cuando el proceso se produce a temperatura constante, debido a una reducción de la presión, se le llama cavitación. El proceso de vaporización requiere una interfaz de líquido o gas en general pequeñas burbujas de gas (o núcleos) atrapados en la frontera o en partículas suspendidas en el líquido.

La cavitación se produce cuando un líquido a temperatura constante alcanza la presión de saturación a esa temperatura. En un sistema de flujo, la reducción de la presión es causada por una combinación de una reducción en el promedio de la presión debido a los aumentos de velocidad y por las reducciones de la presión dentro de los vórtices turbulentos creados en la estrangulación asociados con capas de separación de flujo y las capas límite. Cuando la presión local dentro de estos vórtices baja por debajo de la presión de vapor, y si una burbuja está atrapada en el interior de uno de éstos, una cavidad de vapor puede formarse. Para las válvulas, la cavitación comienza siempre antes del promedio de las caídas de presión a la presión de saturación. Si la presión local en el interior del vórtice se mantiene en la presión de vapor durante un tiempo suficiente, la cavidad puede alcanzar un diámetro crítico y crecer rápidamente. Dado que el ambiente, o promedios de presión entorno a la cavidad es superior a la presión de vapor, la burbuja se vuelve inestable y se hunde. El colapso es violento, produciendo presiones de hasta 670 MPa y está por lo general acompañado por ruido, vibraciones y posibles daños estructurales.

2.2.2 Cuantificación de la cavitación en válvulas.

Un parámetro de cavitación adimensional es necesario para cuantificar la intensidad de la cavitación en diferentes condiciones de flujo. Para una válvula, la fuerza que provoca la cavitación es proporcional a la caída de presión a través de la válvula, P_{net} , por lo que el parámetro de la cavitación sigma resultante, puede ser expresado como:

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{P_{net}} \quad (\text{Ec.1})$$

Para las válvulas y otros dispositivos que crean una caída de presión, el parámetro de la cavitación, se puede definir de varias maneras. La presión de referencia en el numerador de la Ecuación 1 puede ser la de aguas arriba o la de aguas abajo. Usando la presión aguas abajo P_2 , está se convierte en:

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_{net}} \quad (\text{Ec.2})$$

2.2.3 Coeficientes de válvulas.

El potencial de cavitación de una válvula generalmente varía con la apertura de la misma. Esta relación puede ser expresada Representación gráficamente el valor de σ a la apertura de una válvula para un nivel dado de cavitación. Dicha relación será única para cada válvula. Sin embargo, si se desea comparar el rendimiento de la cavitación de válvulas similares, es mejor hacer la comparación sobre la base de un coeficiente de flujo, en lugar del coeficiente relacionado con la apertura de la válvula.

La relación entre el flujo y la caída de presión en cualquier apertura de las válvulas pueden ser expresadas por cualquiera de una serie de coeficientes. Al igual que el índice de cavitación, estos coeficientes se derivan de una relación de fuerzas, en este caso, es la relación de fuerzas de inercia a las fuerzas de presión. Numerosas formas de estos coeficientes se han propuesto, y se utilizan para esta investigación los siguientes:

2.2.3.1 Coeficiente de descarga (Cd).

Es un coeficiente adimensional, varía de cero cuando la válvula está completamente cerrada a uno cuando la válvula no tiene pérdidas de presión en la posición de completa apertura. La variación del potencial de la cavitación respecto del ángulo de apertura de la válvula puede ser expresada en una representación gráfica de la variación de σ con respecto a C_d , lo que permite comparaciones directas de los valores de cavitación para tipos similares de válvulas. El coeficiente de flujo puede ser expresado como:

$$C_d = \frac{V}{\sqrt{\frac{2 P_{net}}{\rho} + V^2}} \quad (\text{Ec.3})$$

2.2.3.2 Coeficiente de flujo

No es un coeficiente adimensional, pero es uno de los parámetros más utilizados para cuantificar fácilmente la capacidad de flujo de diferentes válvulas.

Físicamente significa la tasa de flujo que pasaran por una válvula cuyo diferencial de presión será psi. Debido a que C_v es dimensional, varia respecto al diámetro de la válvula es por ello que se utiliza un coeficiente $C_v d^2$ que permite hacer comparaciones entre válvulas similares de diferentes tamaños. El coeficiente de flujo puede ser expresado de la siguiente manera:

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\frac{P_{net}}{SG}}} \quad (Ec.4)$$

$$\frac{C_v}{d^2} = \frac{Q}{d^2 \sqrt{\frac{P_{net}}{SG}}} \quad (Ec.5)$$

2.2.3.3 Coeficiente de pérdida de carga

Es un coeficiente adimensional y es utilizado normalmente en las ecuaciones de energía, para calcular las pérdidas de presión a través de la válvula o cualquier otra pérdida local.

$$K = \frac{2 P_{net}}{V^2} \quad (Ec.6)$$

2.2.4 Factor de recuperación de presión (F_L).

Otro parámetro que puede utilizarse para cuantificar el flujo en condiciones de estrangulación es el factor de recuperación de presión de líquido F_L . Se define como la relación entre el C_v en presencia de cavitación y el P_v característico de la válvula en ausencia de cavitación y se expresa de la siguiente manera:

$$F_L = \frac{Q}{C_v \sqrt{\frac{(P_1 - F_t P_v)}{SG}}} \quad (Ec.7)$$

Donde Q es el flujo estrangulado[gpm] para aplicaciones por debajo de los 94C° para $F_t = 1$.

2.2.5 Límites de la cavitación en válvulas.

La Cavitación causa, ruido, fluctuaciones de presión, vibraciones, daños erosivos, y en estados avanzados, puede reducir la capacidad de la válvula. El nivel aceptable de cavitación de una válvula en un sistema dado, varía de acuerdo al tipo de válvula, función de la válvula, detalles en el diseño de las tuberías y duración de la operación. Por ejemplo, en una válvula de control requerida para operar continuamente, sería mejor seleccionar un diseño con un nivel bajo de cavitación, de esta manera no se produciría daños por erosión y el ruido y las vibraciones no serían excesivas. En contraste, una válvula destinada para uso intermitente exclusivamente, tal como una válvula de liberación de presión, podría ser diseñada para operar bajo un alto nivel de Cavitación.

2.2.6 Cavitación incipiente (σ_i) y constante (σ_c).

La intensidad de la cavitación en el estado incipiente, consiste en la aparición de ligeros e intermitentes sonidos, los cuales son escasamente audibles por sobre el turbulento sonido de fondo producido por el líquido fluyente. Es por ello que la cavitación Incipiente, se corresponde con un límite de diseño muy conservador y su uso es sugerido sólo cuando el ruido de la cavitación no puede ser tolerado. Debido a lo conservador del diseño, sólo ha sido evaluado en pocas válvulas y no está generalmente recomendado como diseño o límite operacional, es primordialmente de interés académico para identificar las condiciones de flujo cuando aparece por primera vez la cavitación.

En la cavitación constante, la intensidad es más o menos la misma que para la incipiente, pero la cavitación es constante más que intermitente. El sonido es similar a tocino friéndose o a cotufas explotando. La cavitación específica no está generalmente considerada objetable y no debería causar daño o reducir la vida útil de la válvula. Para la mayoría de las aplicaciones, la condición específica es recomendada para lo que podría ser denominado como “operación libre de cavitación”. Esto sería el diseño límite para una válvula requerida para trabajar en

forma continua en un ambiente donde una leve cantidad de ruido de cavitación puede ser tolerado, pero ruido intenso, vibraciones intensas, y daño erosivo deben ser evitados. Considerable cantidad de datos experimentales están disponibles, identificando la cavitación específica para diferentes tipos de válvulas.

La cavitación puede ser detectada tanto visual como auditivamente. Si se observa a través de una sección transparente, los eventos de este proceso pueden ser vistos a simple vista o con la ayuda de luces estroboscópicas. La cavitación puede también ser fácilmente detectada auditivamente, excepto en un sistema donde se halla un nivel de ruido de fondo extremadamente alto. Un observador entrenado puede ser bastante preciso en detectar estados iniciales de cavitación sin necesidad de usar la ayuda de instrumentos electrónicos. Aun cuando se usan medios electrónicos para medir la cavitación, es útil grabar el nivel audible de ruido para ayudar a interpretar las mediciones electrónicas de la cavitación.

2.2.7 Cavitación

Mientras el nivel de cavitación se incrementa más allá del nivel de cavitación constante, la intensidad del ruido y la vibración, así como el potencial daño por erosión se incrementa rápidamente. El margen entre el nivel leve de cavitación y el límite crítico y el punto de daño incipiente varía en atención al diseño de la válvula. Debido a esto la intensidad del ruido y la vibración en el punto de daño incipiente varía dependiendo del dispositivo de prueba.

El daño erosivo no comienza hasta que las cavidades de vapor tienen suficiente energía y el colapso ocurre sobre un límite sólido o muy cercano a éste. Si la válvula está diseñada como un orificio con un amplio radio de expansión, el colapso ocurre lejos de los límites, y la cavitación fuerte es posible aún sin daños erosivos. Normalmente los daños erosivos comienzan mucho antes que la válvula comience a atascarse y antes de que el ruido y la vibración alcancen su máximo nivel de intensidad. La cavitación con daño incipiente es usualmente el próximo factor operativo limitante después de la cavitación constante y no puede ser evaluado a partir de los datos obtenidos por acelerómetro.

La Figura 1 muestra un procedimiento para determinar la cavitación con daño id, pero sólo una poca cantidad de datos e información está disponible debido a las dificultades experimentales implicadas en la medición en el momento en que se establece el daño erosivo. El límite se corresponde con las condiciones en que la ruptura es observada por primera vez en un blando espécimen de aluminio colocado en los límites o bordes. El aluminio blando ha sido usado como material de prueba ya que reduce el tiempo de prueba y provee un valor conservador para id.

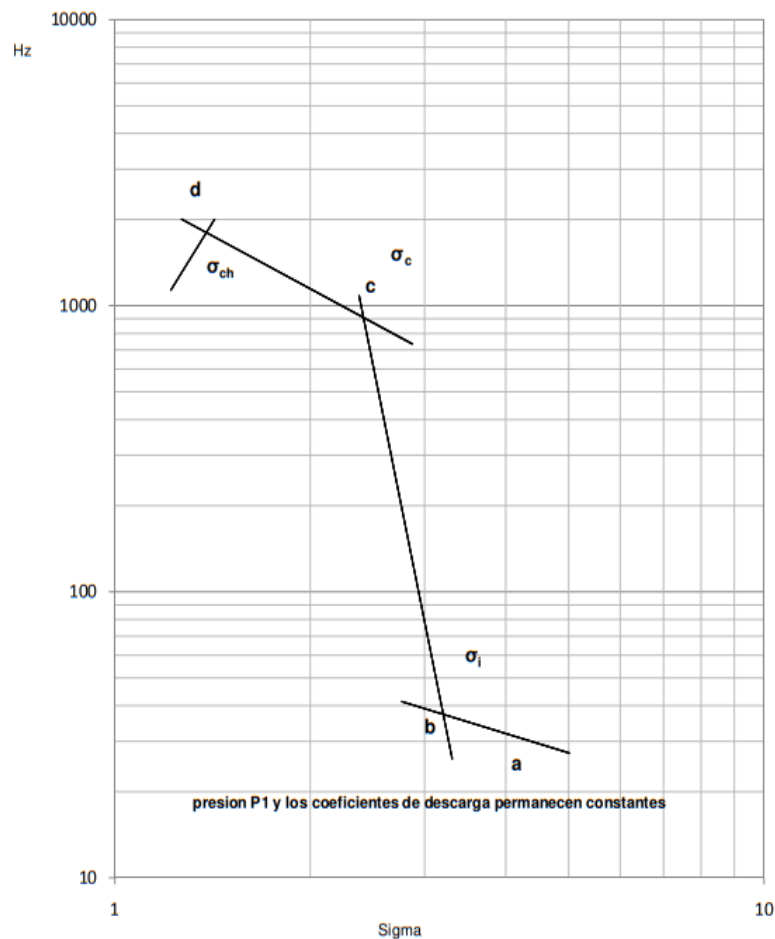


Figura 1: Evaluación de la cavitación critica y la cavitación incipiente.

Fuente: Y. Cengel. Fundamentos de mecánicas de fluidos (2007)

El paso inicial en el procedimiento de prueba implica colocar dentro del cuerpo de la válvula o en una tubería adyacente donde la cavitación ocurre

inicialmente. Para algunos dispositivos como el orificio y ciertos estilos de válvula, es bastante obvio donde aparecerá inicialmente el daño. Si esto no es obvio un método para localizar el daño es cubrir el cuerpo de la válvula y las tuberías adyacentes con pintura y accionar la válvula en cavitación moderada por algunas horas e inspeccionar la válvula para determinar los sitios en donde la pintura se ha removido. Si no se observa ninguna área sin pintura, el nivel de cavitación puede ser aumentado y esta prueba puede ser repetida. Una vez que el área dañada es identificada, los especímenes de aluminio son preparados, cuidadosamente pulidos con un acabado de espejo e inspeccionados con una lente de bajo poder de magnificación para estar seguros de que la superficie no tiene manchas que luzcan como roturas de cavitación. Los especímenes son posteriormente instalados en la válvula o en la tubería. Ellos deberán ser instalados al ras del margen para no crear así turbulencias locales que puedan recrear la cavitación.

2.2.8 Cavitación súbita.

Una vez que la válvula está operando en el límite de daño, el próximo límite de interés sería cierto nivel limitante de ruido, vibración y Cavitación con Atascamiento. Algunos datos indican que la máxima intensidad de ruido ocurre después de que la válvula comienza a atascarse. Es por esto que el próximo límite de condición operacional de incremento de la intensidad de la cavitación, es generalmente el atascamiento. La cavitación con atascamiento es un concepto muy simple, pero se hallan un número de factores que lo hacen un fenómeno relativamente complejo. Para comprender el proceso de atascamiento, se debe considerar el flujo a través de un orificio.

En la Figura 2 se muestra el efecto de la cavitación de atascamiento sobre la recuperación de la presión para una placa orificio. La variación de presión para un flujo a través de un orificio puede ser mostrado gráficamente a través de la esquematización de las líneas de gradiente hidráulico (HGL). La línea superior (HGL 1) de la Figura 2, representa la variación de la presión, a lo largo de la línea central de la línea de flujo, para un flujo sin atascamiento a través de un orificio.

La menor presión se observa justo corriente abajo, del orificio en la vena contracta. La recuperación del flujo ocurre a medida que el flujo es disipado y el gradiente hidráulico se restablece.

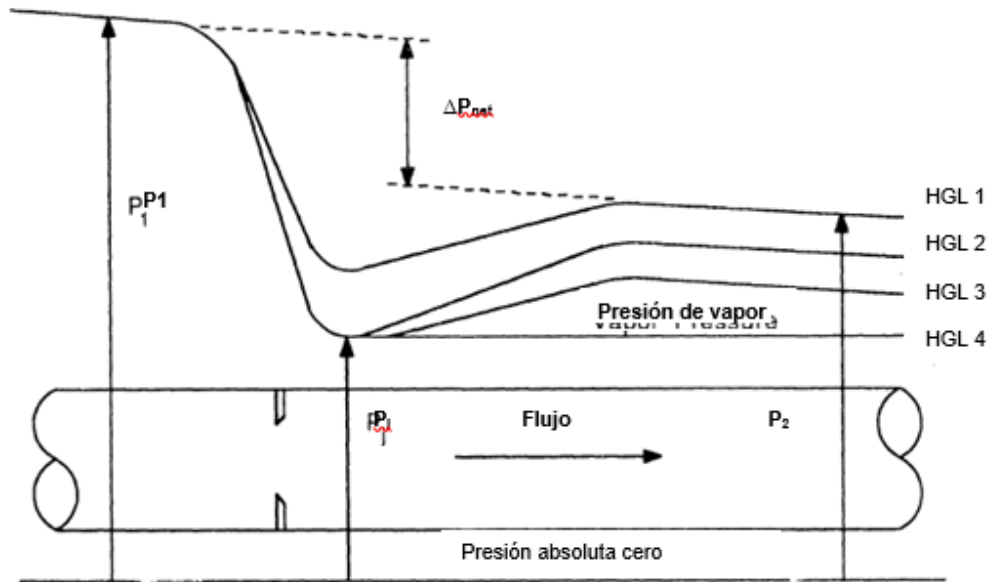


Figura 2: Líneas hidráulicas por grado de cavitación.

Fuente: Y. Cengel, Fundamentos de mecánica de fluidos (2007)

El comportamiento del cambio de presión neta también puede ser evaluado gráficamente, proyectando las líneas de gradiente hidráulico corriente arriba y corriente abajo y midiendo la separación vertical entre ellas. Esto es realizado numéricamente midiendo la caída neta de presión ($P_1 - P_2$) y restando la pérdida de fricción calculada entre las dos. Note que P_2 debe estar suficientemente lejos del orificio o la válvula, para asegurar el restablecimiento de la presión. Normalmente seis diámetros es la distancia recomendada.

Una vez que una válvula o un orificio comienzan a atascarse, la magnitud del coeficiente de pérdida y el coeficiente de flujo cambian. Para entender esto, refiérase nuevamente a la Figura 2. El efecto del atascamiento puede explicarse discutiendo las cuatro líneas de gradiente hidráulicos. HGL 1 representa las típicas condiciones de

flujo antes que el atascamiento ocurra, esta muestra la pérdida normal de presión y la recuperación de HGL. Note que la línea de presión absoluta y la línea de presión de vapor se contraponen verticalmente de manera que la tubería y el orificio pueden ser observados entre ambas.

Si la presión de flujo arriba es mantenida constante y se incrementa el flujo disminuyendo la presión en P_2 , eventualmente la presión promedio en la vena contracta en P_j caerá hasta la presión de vapor. HGL 2, representa tal condición. Desde que el flujo a través de una válvula u orificio es determinado por $P_1 - P_j$, el flujo no puede ser incrementado por disminuciones adicionales de la presión en P_2 , debido a que la presión mínima promedio en la válvula " P_j ", no puede caer por debajo de la presión de vapor.

El caudal Q_{ch} es el flujo máximo a pasar por un orificio a una presión P_1 predeterminada. Más allá de este punto, el coeficiente de descarga se mantiene constante e igual a su valor para el flujo no cavitante.

Si la presión en la tubería corriente abajo en P_2 se reduce aún más, el flujo y la presión en P_j permanecen constantes pero la cavidad de vapor incrementa su longitud. HGL 3 en la figura 2. muestra esta condición.

A medida que la presión corriente abajo es nuevamente reducida, la cavidad de vapor eventualmente se extiende más allá de P_2 como se muestra por HGL 4, $P_2 = P_v = 1$. Esta condición es conocida como cavitación, Flujo intermitente o totalmente atascada. Si se observa a través de una tubería transparente, uno podría ver lo que parece ser un flujo de descarga libre, pero el chorro está rodeado por una cavidad de vapor en vez de aire. El bolsillo de vapor puede extenderse por muchos diámetros y el colapso de la cavidad puede ocurrir lejanamente a la válvula.

2.2.9 Modelación matemática

A continuación, se presentan los modelos matemáticos utilizados para realizar la simulación del campo de flujo, a través de la geometría de la válvula y se presenta

el modelo de Rayleigh – Plesset, el cual permite predecir la aparición de burbujas de vapor en el flujo, que ocasionan el fenómeno de la cavitación.

2.2.10 Leyes de la conservación

Para describir el fenómeno del flujo a través de una válvula de mariposa donde se pretende evaluar la posibilidad de que ocurra el fenómeno de cavitación son usadas tres leyes de la conservación, fundamentadas en la descripción del flujo bifásico. Estas son las leyes para la conservación de la masa o ecuación de la continuidad, la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la fracción de volumen y se introducen a continuación.

2.2.10.1 Ecuación de la Continuidad.

El modelo homogéneo multifásico para la ecuación de la continuidad es el siguiente:

$$\frac{d(r_{\alpha} \alpha)}{dt} + \alpha \cdot (r_{\alpha} - \alpha U) = M_S + \sum_{\beta=1}^{N_p} r_{\alpha\beta} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde M_S es la fuente de masa y $r_{\alpha\beta}$ es la tasa de flujo másico por unidad de volumen de la fase α a la fase β .

2.2.10.2 Ecuación de la cantidad de movimiento

El modelo homogéneo para la ecuación de transporte asume:

$$U_{\alpha} = U, \quad \alpha = 1, \dots, N_p$$

Donde N_p es el número de fases.

$$= \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha} \alpha \quad (\text{Ec.9})$$

$$= \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha} \alpha \quad (\text{Ec.10})$$

El modelo homogéneo no toma en cuenta el término de transferencia de calor entre fases.

Es esencialmente un modelo de transporte de una sola fase, con densidad y viscosidad variable.

2.2.10.3 Ecuación de la conservación de la fracción de volumen

El modelo homogéneo no toma en cuenta el término de transferencia de calor entre fases. Se asume fases incompresibles, sin fuentes de masa. Y la ecuación de la conservación de la fracción de volumen se presenta mediante las siguientes expresiones:

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha} = 1 \quad (\text{Ec.11})$$

$$\sum_{\alpha} \cdot (r_{\alpha} U) = 0 \quad (\text{Ec.12})$$

2.2.10.4 Limitación de Presión.

El conjunto completo de ecuaciones hidrodinámicas representan $4N_p+1$ ecuaciones de las $5N_p$ incógnitas $U_{\alpha}, V_{\alpha}, W_{\alpha}, r_{\alpha}, P_{\alpha}$. Se necesitan $N_p - 1$ ecuaciones más para cerrar el sistema. Estas son dadas por las limitaciones de la presión, a saber, que todas las fases comparten la misma presión.

$$P_{\alpha} = P \text{ para todo } \alpha = 1, \dots, N_p \quad (\text{Ec.13})$$

2.2.11 Modelos de Turbulencia “Eddy Viscosity”.

Una propuesta sugiere que la turbulencia se compone de pequeños remolinos que se forman y disipan continuamente, en la cual los esfuerzos de Reynolds se asumen proporcionales a los gradientes de la velocidad media. Esto define a los modelos “Eddy-Viscosity”.

Esta hipótesis supone que los esfuerzos de Reynolds pueden estar relacionados con los gradientes de velocidad promedio y la viscosidad de “Eddy”, a través de la hipótesis del gradiente de difusión.

2.2.11.1 El modelo “Shear Stress Transport” (SST).

El modelo (SST) basado en el transporte de esfuerzos cortantes, brinda una alta precisión en la predicción de la aparición y cantidad de la separación de flujos bajo condiciones de gradientes de presión adversas; esta alta precisión se obtiene limitando la formulación de “Eddy Viscosity”: mediante las siguientes expresiones:

$$V_F = \frac{{}_1K}{\max({}_1w, SF_2)} \quad (\text{Ec.14})$$

Donde:

$$V_F = \frac{M_t}{\quad} \quad (\text{Ec.15})$$

F_2 es una función de mezcla, al igual que F_1 , la cual el restringe el limitador de la capa límite de la pared y S es un invariante de medida de la velocidad de deformación.

La mezcla de funciones es esencial para el éxito del método. Su formulación se basa en la distancia más cercana a la superficie y en las variables de flujo. Estas formulaciones son:

$$F_1 = \tanh(\arg_1)^4 \quad (\text{Ec.16})$$

Con:

$$\arg_1 = \min\left(\max\left(\frac{\bar{k}}{B y}, \frac{500v}{y^2}\right), \frac{k}{CD_{k\omega} \omega 2Y^2}\right) \quad (\text{Ec.17})$$

Donde y es la distancia a la pared más cercana, además:

$$CD_{k\omega} = \max\left(\frac{1}{\omega^2} k, 1.0 \times 10^{-10}\right) \quad (\text{Ec.18})$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2)^2 \quad (\text{Ec.19})$$

Con:

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2 \bar{k}}{B y}, \frac{500v}{y^2}\right) \quad (\text{Ec.20})$$

2.2.11 Modelación de la cavitación.

La tendencia de un fluido a cavitarse se caracteriza por el número de cavitación, definido por:

$$C_v = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} U^2} \quad (\text{Ec.21})$$

Donde P es una presión de referencia del fluido, P_v es la presión de vapor del líquido, y el denominador representa la presión dinámica del fluido, claramente la tendencia a cavitarse aumenta a medida que el número de cavitación disminuye.

La cavitación se trata por separado de los cambios térmicos en la fase, ya que el proceso de cavitación es normalmente demasiado rápido para asumir la hipótesis de equilibrio térmico en la interfaz. En los modelos más sencillos de cavitación, la transferencia de masa es impulsada por los efectos puramente mecánicos.

2.2.11.1 El modelo Rayleigh Plesset

Las ecuaciones de Rayleigh Plesset proporcionan la base para el tipo de ecuación que controla la generación de vapor y condensación. Las ecuaciones de

Rayleigh – Plesset describen que el aumento de las burbujas de gas en un fluido está dado por:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{P_V - P}{\rho_f R_B} = \frac{2\sigma}{R_B} \quad (\text{Ec.22})$$

Donde R_B representa el radio de la burbuja, P_V es la presión en la burbuja (se asume la presión de vapor a la temperatura del líquido), P es la presión en el líquido que rodea las burbujas, ρ_f es la densidad del líquido, σ es el coeficiente de tensión superficial entre el líquido y el vapor. Asumiendo que no hay barreras térmicas que impidan el crecimiento de la burbuja. Obviando las ecuaciones de segundo término y la tensión superficial esta ecuación se convierte en:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_V - P}{\rho_f}} \quad (\text{Ec.23})$$

La tasa de cambio del volumen de las burbujas está definida por:

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) \quad (\text{Ec.24})$$

$$\frac{dV_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_V - P}{\rho_f}} \quad (\text{Ec.25})$$

La tasa de cambio de la masa de las burbujas está definida por:

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_g \frac{dV_B}{dt} \quad (\text{Ec.26})$$

$$\frac{dm_B}{dt} = R_B^2 \frac{r_g}{\rho} \sqrt{\frac{2 P_V - P}{3 \rho}} \quad (\text{Ec.27})$$

Si hay N_B Burbujas por unidad de volumen, la fracción de volumen r_g puede ser expresada como:

$$r_g = V_B N_B \quad (\text{Ec.28})$$

$$r_g = \frac{4}{3} R_B^3 N_B \quad (\text{Ec.29})$$

Y la expresión total de la tasa de transferencia de masa por unidad de volumen es:

$$\frac{dm_B}{dt} = \frac{3 r_g}{R_B} \frac{\rho}{\rho} \sqrt{\frac{2 P_V - P}{3 \rho}} \quad (\text{Ec.30})$$

La expresión ha sido derivada asumiendo un crecimiento de las burbujas (evaporación). Esta puede ser generalizada incluyendo la condensación:

$$m_{fg} = F \frac{3 r_g}{R_B} \frac{\rho}{\rho} \sqrt{\frac{2 P_V - P}{3 \rho}} \text{sgn}(P_V - P) \quad (\text{Ec.31})$$

Donde F es un factor experimental, el cual puede diferir para la condensación y la vaporación, creado para justificar, el hecho de que la tasa de crecimiento entre la vaporización y la condensación puede variar (la condensación es usualmente más lenta que la vaporización). Aunque la ecuación 27 ha sido generalizada para la vaporización y condensación, ésta requiere pequeñas modificaciones en el caso de la vaporización.

La vaporización se inicia en el núcleo. Así como la fracción de volumen se incrementa, en el núcleo la densidad debe reducirse progresivamente, desde donde hay menos líquido. Para la vaporización r_g en la ecuación es remplazado por:

$$r_{nuc}(1 - r_g) \quad (\text{Ec.32})$$

$$m_{fg} = F \frac{3r_{nuc}(1 - r_g)g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_V - P}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(P_V - P) \quad (\text{Ec.33})$$

Donde r_{nuc} es la fracción volumétrica del núcleo.

Para obtener una tasa de transferencia de masa en la interfase, se requieren de la especificación de algunas medidas y concentraciones de las burbujas. El modelo Rayleigh – Plesset implementa los siguientes valores por defecto:

$$R_B = 1 \text{ m}$$

$$R_{nuc} = 5 \times 10^{-4}$$

$$F_{vap} = 50$$

$$F_{con} = 0.01$$

2.2.12 Teoría de la dinámica computacional de fluidos (CFD)

Dos métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos son: experimentación y cálculo. El primero conlleva, por lo general, la construcción de modelos que son probados con túneles de viento u otras instalaciones, mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales, ya sea de manera analítica o computacional. Los ingenieros modernos aplican tanto análisis experimental como CFD, 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 CFD 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 CFD al comparar las cantidades globales determinadas de manera computacional y experimental. La CFD se emplea entonces para abreviar el ciclo de diseño por estudios paramétricos que son controlados con cuidado, de modo que se reduce la cantidad necesaria de análisis experimental.

El estado actual de la dinámica de fluidos computacional es éste: puede manejar flujos laminares con facilidad, pero los flujos turbulentos de interés práctico son imposibles de resolver sin tener que recurrir a los modelos de turbulencia. Por desgracia, ningún modelo de turbulencia es universal, y una solución de la CFD de flujo turbulento es tan buena dependiendo que tan apropiado es el modelo de turbulencia aplicado. Pese a esta limitación, los modelos de turbulencia estándares producen resultados razonables para muchos problemas de prácticos ingeniería.

2.2.13 Procedimiento de solución.

Para resolver de manera numérica las ecuaciones de gobierno en un problema de mecánica de fluidos, se efectúan los siguientes pasos:

1. Se elige un dominio computacional y se genera una malla (conocida también como red de nodos); el dominio se divide en muchos elementos pequeños llamados celdas. Para dominios de dos dimensiones (2-D), las celdas son áreas, mientras que para dominios tridimensionales (3-D) las celdas son volúmenes, (ver Figura 3). Puede considerarse a cada celda como un pequeño volumen de control en el que se resuelven las versiones separadas de las ecuaciones de conservación y transporte.

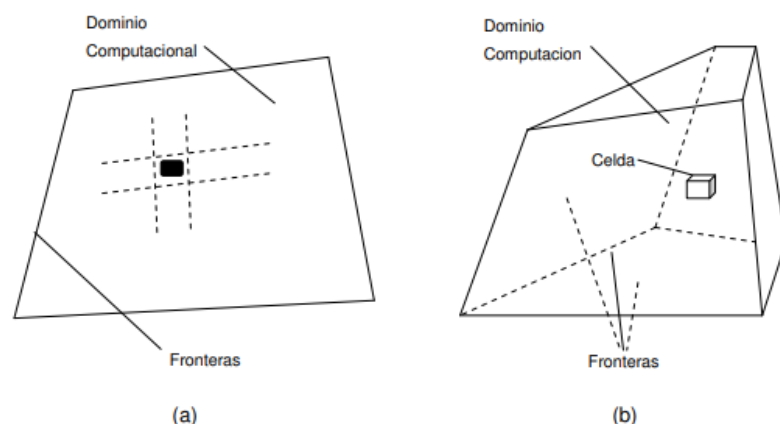


Figura 3: Dominio Computacional.

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide

Un dominio computacional es la región en el espacio en la cual las ecuaciones de movimiento se resuelven mediante la CFD. Una celda es un subconjunto pequeño del dominio computacional. Se ilustran (a) un dominio bidimensional y celdas cuadriláteras, y (b) un dominio tridimensional y celdas hexaédricas. Los límites de un dominio bidimensional se denominan lados, y los límites de un dominio tridimensional se llaman caras.

2. Las condiciones de frontera se especifican en cada lado del dominio computacional (flujos 2-D) o en cada cara del dominio (flujos 3-D).
3. Se especifica el tipo de fluido (agua, aire y gasolina, entre otros), junto con las propiedades del fluido (temperatura, densidad y viscosidad, entre otros). La mayoría de los paquetes de CFD tienen integrada la base de datos de propiedades de fluidos más comunes, lo que hace este paso relativamente fácil.
4. Se seleccionan los parámetros numéricos y los algoritmos de solución.
5. Los valores de primera aproximación para las variables de campo de flujo se especifican para cada celda. Estas son condiciones iniciales, que podrían ser correctas o no, pero son necesarias como un punto de partida, para que el proceso de iteración pueda proceder.
6. Al comenzar con los valores de primera aproximación, las formas discretizadas de las ecuaciones se resuelven por iteración, por lo general en el centro de cada celda. Si se trasladaran todos los términos de la ecuación a un lado para obtener cero del otro lado de la ecuación, entonces la solución numérica sería “exacta” cuando la suma de todos estos términos, llamada el residuo, se volvería cero para cada celda del dominio en una solución de la de CFD, sin embargo, esta suma nunca es igual a cero, pero es de esperar que disminuya conforme se efectúen las iteraciones. Un residuo puede considerarse como una medida de la desviación de una solución numérica para determinada ecuación de conservación o transporte respecto a la solución exacta, y se tiene que monitorear el residuo promedio relacionado con cada

ecuación de conservación o transporte para ayudar determinar cuándo converge la solución. A veces se necesitan cientos, o inclusive miles, de iteraciones para que converja la solución a una solución final, y los residuos pueden disminuir en varios órdenes de magnitud.

7. Cuando converge la solución, las variables de campo de flujo como la velocidad y la presión se trazan y analizan de manera gráfica. Se pueden definir y se analizan también otras funciones particulares que se forman mediante combinaciones algebraicas de variables de campo de flujo. La mayoría de los paquetes de CFD tienen integrados post-procesadores, diseñados para analizar el campo de flujo de manera gráfica y rápida.
8. Las propiedades globales del campo de fluido, como la caída de presión, las propiedades integrales, como las fuerzas (de sustentación y de arrastre), los torques que actúan sobre un cuerpo, se calculan a partir de la solución que se obtiene por convergencia. Con la mayoría de los paquetes de CFD, esto puede hacerse “sobre la marcha” a medida que proceden las iteraciones. En numerosos casos, de hecho, es aconsejable monitorear estas cantidades junto con los residuos durante el proceso de iteración; cuando converge una solución, las propiedades globales e integrales deben establecerse en valores constantes también.

2.2.14 Generación e independencia de la malla.

El primer paso (y posiblemente el paso más importante) en una solución de CFD, es generar una malla que define las celdas en las que se calculan las variables de flujo (velocidad y presión, entre otras) en todo el dominio computacional. Los modernos paquetes comerciales de la CFD, vienen con sus propios generadores de malla, y también están disponibles programas para generar mallas independientes.

2.2.14.1 Mallas estructuradas.

Una malla estructurada consta de celdas planas con cuatro lados (2-D) o celdas volumétricas con seis caras (3-D). Aunque la forma rectangular de las celdas

podría estar distorsionada, cada celda se numera de acuerdo con los índices (i, k) que no necesariamente corresponden a las coordenadas x, y y z.

2.2.14.2 Malla no estructuradas.

Una malla no estructurada de celdas de varias formas, usualmente se emplean triángulos o cuadriláteros (2D) y tetraedros o hexaedros (3D). se generan dos mallas no estructuradas para el mismo dominio, con la misma distribución de intervalos en los datos. A diferencia de mallas estructuradas no puede identificarse a la celda de manera única mediante los índices i y j: en cambio las celdas se numeran internamente de alguna otra manera por el paquete CFD.

En las capas límite, donde las variables de flujo cambian con rapidez en la dirección normal a la pared y se requieren mallas de alta resolución en la cercanía a ésta, las mallas estructuradas permiten una resolución mucho más fina que las no estructuradas para el mismo número de celdas.

Se debe enfatizar que sin importar el tipo de malla que se elija (estructurada o no estructurada, cuadrilátera o triangular, entre otros), es la calidad de la malla lo que es más imprescindible para soluciones confiables de la CFD. En particular, debe tenerse siempre cuidado que cada una de las celdas no esté muy sesgada porque esto puede crear dificultades e inexactitudes de convergencia en la solución numérica. Hay varias clases de sesgo, tanto para celdas de dos como de tres dimensiones; el tipo de sesgo más apropiado para celdas bidimensionales es el sesgo equiángulo.

2.2.15 Verificación de la geometría

Los paquetes computacionales que realizan procedimientos de discretización de volúmenes, incorporan algoritmos de verificación de la calidad de las particiones, relaciones dimensionales entre los elementos discretos, así como también la morfología de los mismos que garanticen una distancia promedio y uniforme entre los nodos computacionales. Entre los más relevantes se encuentran:

2.2.15.1 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 éstos; usando como criterio el valor de tolerancia de longitud mínima de un eje, como $1,6 \times 10^{-1}$ [mm].

2.2.15.2 Verificación de caras “sliver face checking”.

Es un factor de verificación de geometría que relaciona el perímetro con el área para cada cara. Caras con un alto factor de sliver face pueden resultar en mallas con una pobre calidad superficial.

2.2.15.3 Verificación de la distorsión “parametrization face checking”.

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

2.2.16 Calidad de la malla.

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

2.2.16.1 Ortogonalidad de la malla “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). Ver Figura 4.

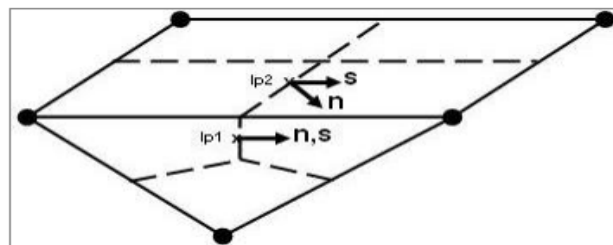


Figura 4: Ortogonalidad de la malla “Mesh Orthogonality” , el mínimo ángulo de ortogonalidad aceptable es 20°

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide

2.2.16.2 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 expansión factor” recomendado para las aplicaciones es 20, se puede observar en la Figura 5.

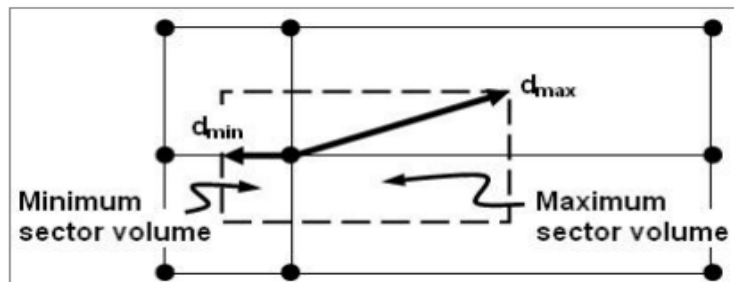


Figura 5: Factor de expansión de la malla “Mesh Expansion Factor”

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide)

2.2.16.3 Aspecto del 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 y envuelve la relación entre la máxima distancia y la mínima área adyacentes a cada nodo a través de todo el dominio, (ver en la Figura 6). Un rango aceptable de “Mesh Aspect Ratio” sería < 100 .

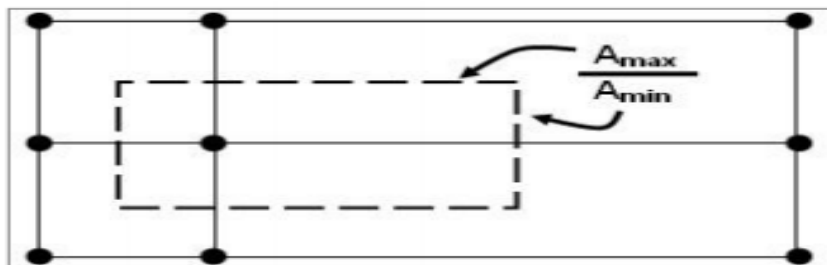


Figura 6: Aspecto del radio de la malla “Mesh Aspect Ratio”

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide

2.2.17 Criterio de convergencia de la raíz media promedio.

El Residuo de la raíz media promedio o RMS por sus siglas en inglés “Root Mean Squar”, 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 o “TimeStep”. Una solución razonable de convergencia exige un máximo nivel residual no superior a 5×10^{-4} . Normalmente, el RMS residual será un orden de magnitud inferior a éste, por lo que un buen criterio de convergencia sería obtener un nivel residual de RMS, no mayor a 1×10^{-4} .

2.3 Glosario de términos

Fluido: Es una sustancia en la fase líquida o en la gaseosa, que se deforma de manera continua bajo la influencia de un esfuerzo cortante.

Caudal: Cantidad de fluido que pasa por segundo por un área determinada.

Cantidad de movimiento: Es la cantidad de movimiento por unidad de volumen integrada sobre el volumen, donde la cantidad de movimiento por unidad de volumen es la densidad de la partícula material multiplicada por su velocidad.

Ecuación de continuidad: Se usa para relacionar la densidad del fluido, el área del fluido y la velocidad de éste en dos secciones del sistema donde existe flujo estable. Es válido para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

Flujo: El flujo de una cantidad por una superficie. Por ejemplo, el flujo de la energía siempre va desde algún lugar a otro, es decir que la naturaleza del vector es importante.

Gradiente: El índice de mayor cambio por unidad de longitud de una variable en el espacio a partir de un punto de interés.

Temperatura: La Temperatura es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee.

Presión: Se define como el cociente entre la componente normal de la fuerza sobre una superficie y el área de dicha superficie.

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

Energía: La energía puede existir en numerosas formas: térmica, mecánica, cinemática, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, y su suma contribuye en la energía total “E” (o e con base en una cantidad de masa) de un sistema.

Energía cinética: Tiene como resultado su movimiento en relación con algún marco de referencia

Energía potencial: Es la energía de un sistema que tiene como resultado de su elevación en un campo gravitacional se llama energía potencial.

Energía Térmica: Es aquella que interviene en los procesos caloríficos que acontece cuando dos cuerpos de diferentes temperaturas se ponen en contacto

Viscosidad: Se define como la resistencia al corte. Se puede decir que es equivalente a la fricción entre dos sólidos en movimiento relativo. En general, la viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura como de la presión

Tensión superficial: Término que suele aplicarse a los líquidos porque es una forma de medir la cohesión que existe entre las moléculas de ese líquido.

Adhesión: Es la propiedad de la materia por la cual se unen y plasman dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.

Cohesión: Es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia.

El número de Reynolds: Es una relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales que actúan sobre un fluido.

Flujo laminar: Se caracteriza porque el movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias bastante regulares, separadas y perfectamente definidas dando la impresión de que se tratara de láminas o capas más o menos paralelas entre sí, las cuales se deslizan suavemente unas sobre otras, sin que exista mezcla o intercambio transversal entre ellas.

Flujo turbulento: El flujo turbulento es cuando el flujo másico en una tubería aumenta hasta valores del número de Reynolds superiores a 2100.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En esta sección se expone de forma precisa el tipo de datos que se requieren indagar para el logro de los objetivos de la investigación, así como la descripción de los distintos métodos y las técnicas que posibilitan obtener la información necesaria para su ejecución, donde se hace un recuento de los recursos disponibles y se describe el procedimiento empleado para la modelación numérica en válvulas de mariposa.

3.1 Tipo de Investigación

La investigación puede ser de varios tipos, y en tal sentido se puede clasificar de distintas maneras, sin embargo, es común hacerlo en función de su nivel, de acuerdo a esto podemos clasificarlas en; investigación exploratoria, la cual se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado y su resultado constituye una visión aproximada de dicho objeto, la investigación descriptiva, la cual consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento, y la investigación explicativa que se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa y efecto.

Esta investigación será de tipo exploratoria, ya que se caracteriza por explorar el comportamiento del campo de flujo incompresible que pasa a través de una válvula tipo mariposa mediante la manipulación de las variables envueltas en el mismo, utilizando técnicas de aproximación numérica, y adelantos de la Dinámica de Fluido Computacional o CFD.

3.2 Diseño de investigación

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

adoptar para cumplir con los objetivos, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser; Experimental, de Campo o Documental. En base al objetivo general, se concibe que el nivel de la actual investigación será de tipo documental ya que en este se busca obtener y analizar datos provenientes de materiales impresos u otro tipo de documentos para realizar la simulación del campo de flujo a través del dominio fluidizado que rodea a una válvula de tipo mariposa, en este caso con ayuda de una herramienta computacional CFD. Por lo tanto, el estudio se encuentra alineado en este nivel documental.

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

Esta investigación es del tipo de campo ya que se espera describir, entender e interpretar los datos que se obtendrán de la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional o CFD en la cavitación producida en una válvula.

La investigación está orientada según las siguientes etapas: una revisión bibliográfica de la teoría de la cavitación, seleccionar la(s) válvula(s) a estudiar de acuerdo a las bases teóricas disponibles, la determinación de los modelos matemáticos y leyes fundamentales que dominan en la simulación a realizar; y la realización y post-análisis de la simulación numérica.

3.3 Nivel de la investigación

El nivel de conocimiento es descriptivo, y éste consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Hernández (2004), señala que la investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Teniendo como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan una o más variables al ubicar, categorizar y proporcionar la visión de una comunidad, un evento, un contexto, un fenómeno o situación.

En este orden de ideas, la investigación se basa en describir el comportamiento del campo de flujo y sus características de visualización, tales como,

líneas de corriente, perfiles de velocidad, contornos de presión y proporción volumétrica de la fracción de volumen de líquido y vapor, ya que se espera interpretar los datos que se obtendrán mediante la manipulación de las variables involucradas en dicho campo, en una situación rigurosamente controlada y de esta manera fijar los parámetros por los cuales se regirá la investigación.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

Es “el conjunto total finito o infinito de elementos o unidades de observación que se consideran en un estudio, o sea que es el universo de la investigación sobre el cual se se pretende generalizar los resultados” Rísquez, Fuenmayor y Pereira (1999, P.48) “se considera una población finita a la constituida por un número inferior a cien mil unidades (Sierra Bravo, 1991)

3.4.2 Muestra

Sabino (1995) establece que la muestra constituye, solo una parte del conjunto total de la población y es poseedora de sus propias características. Por tanto, una población es homogénea en la medida que sus integrantes se parecen entre sí en cuanto a características, la muestra constituye una porción de la población sobre la que se realiza el estudio.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos observación directa defino y cual uso.

Las técnicas para la recolección de datos son básicamente: revisiones bibliográficas, entrevistas, registros de prensa, observaciones directas, entre otras. Existen diversos instrumentos para la recolección de estos datos los cuales son: computadores, lápiz, hojas, grabadoras, fotografías, entre otras.

Las técnicas a utilizar en el presente trabajo serán:

Localización y consolidación de los datos.

Revisión documental: 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. (Cándelo, 2006).

Y, por último, en el presente trabajo se contará con la utilidad de computadoras para conseguir los resultados obtenidos por la simulación que describen el comportamiento del campo de flujo, con los cuales se procede a comparar con valores experimentales realizados anteriormente y/o formular hipótesis en base a los principios de conservación para lograr la validación de los mismos.

3.6 Fases de la Investigación

Se describirán de manera individual, las respectivas acciones, procedimientos, técnicas y actividades a realizar, para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados.

Fase I: “Revisión de los documentos bibliográficos acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una válvula hidráulica tipo mariposa”

Se hará uso de las herramientas de búsqueda de información, primeramente, digital y luego en físico (de ser necesario) de los antecedentes de la investigación con la finalidad de localizar e identificar las variables y condiciones que se deben conocer sobre el flujo a través de una válvula de tipo mariposa.

Fase II: “Selección de una válvula real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD)”

Luego de una amplia investigación y documentación en base a varios artículos científicos y estudios sobre el campo de flujo compresible a través de una válvula tipo mariposa, se seleccionará una que será nuestro modelo a validar. Se van a determinar los parámetros dimensionales y condiciones de flujo seleccionada para la aplicación de la investigación y los estudios, a fin de manejarlos como data necesaria para realizar los objetivos del proyecto de investigación. El modelado digital se realizará por medio de una herramienta computacional de dibujo asistido por computadora CAD, por sus siglas en inglés.

Fase III: “Simulación el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)”

Lo que se desea en esta fase metodológica es escoger el modelo matemático más adecuado para la simulación, esto es, usar las ecuaciones de Navier-Stokes y el modelo de turbulencia para generar el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que será discretizado, transformado en un sistema de ecuaciones lineales para ser resuelto por el computador mediante el uso de ANSYS® Workbench CFX , una herramienta de CFD para analizar flujos de fluidos.

Fase IV: “Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático”

Los datos obtenidos serán extraídos del programa en forma de data, que posteriormente usando una hoja de cálculo se transformarán en representaciones gráficas, las cuales representarán el comportamiento de las curvas de conservación de masa y momento, así como los modelos de turbulencia. Luego esta información será presenta principalmente de la siguiente forma:

- Curvas de la variación de la velocidad del fluido en la dirección del flujo
- Curvas de la variación de la presión estática del fluido en la dirección del flujo
- Chequeo de cavitación mediante técnicas de visualización de contornos de la fracción de volumen líquido/vapor del campo de flujo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis del proceso de simulación del campo de flujo de agua a través del dominio fluidizado de una válvula mariposa instalada en el interior de una tubería.

4.1 Revisión de los documentos bibliográficos acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una válvula hidráulica tipo mariposa.

A pesar que existen muchas investigaciones sobre la descripción del flujo que pasa alrededor de una válvula, no se explica detalladamente bien los diferentes fenómenos que se presentan dentro de la misma, otros por su parte dieron apoyo en el área de la dinámica de fluidos computacional y del uso de técnicas de aproximación numérica para lograr obtener resultados deseados, pero no existen tantos donde se detallen los diferentes comportamientos que intervienen dentro de la misma, sin embargo, se hizo una investigación bibliográfica en artículos (papers) y tesis de grado, donde se logró obtener algunas variables que suministraron mucha información para guiar esta investigación, como sería el comportamiento del fluido de fluido (agua) cuando pasa a través del obturador, ya que permiten sobre el actuador de cierre los esfuerzos hidrodinámicos, así como los esfuerzos que actúan en ambas caras que pueden estar bastantes equilibradas, pero con el aumento de caudal y las pérdidas de cargas se encontrara rápidamente un golpe de ariete, también la fracción de vapor que se genera mediante esos cambios de presiones y la velocidad de cómo se transporta el fluido mediante el obturador de la válvula, ya que estas variables me definen el comportamiento de la cavitación de una válvula.

4.2 Selección de una válvula real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD)

Se realizó la selección de una válvula mariposa considerando como premisa que es un modelo real de las válvulas usadas en instalaciones de redes hidráulicas para piscinas con fines recreativos para la generación de olas artificiales en su lecho. Tal es el caso de los modelos presentados por la empresa Ozbekoglu CO (<http://www.ozb.com.tr>) con sede principal en Dikmen, Ankara, Turkia, pero con sucursales en más de 36 países y cuya área principal de actividad es el suministro de equipos para la manipulación, mezcla y transporte de líquidos y sólidos a granel, entre ellos la construcción de válvulas de control de flujo y además del suministro de productos, la compañía proporciona soluciones completas para sus clientes al ofrecer todos los servicios requeridos en ingeniería, preventa y posventa.

En el anexo I se muestran características extraídas del catálogo de las válvulas tipo mariposa que fabrican en Ozbekoglu y la respectiva parametrización de la válvula seleccionada.

4.2.1 Dibujo de la válvula.

El dominio se dibuja con una herramienta de diseño comercial ANSYS Workbench, donde así mismo se estudiará la geometría de la válvula que se realizará mediante el uso del mismo programa, el cual fue el más indicado para el dibujo de la misma ya que permite un modelo sencillo y eficaz de la geometría (áreas de entrada y salida, ángulos de convergencia). En la Figura 7 se observa el resultado luego de dibujar el obturador. Las dimensiones son tomadas a partir del catálogo de la marca comercial de la empresa Ozbekoglu y se tomó como característica fundamental un diámetro de tubería de 6", debido a que el catálogo comercial presenta modelos que van desde 2" hasta 10" y se quiso realizar el estudio en un ejemplar promedio.

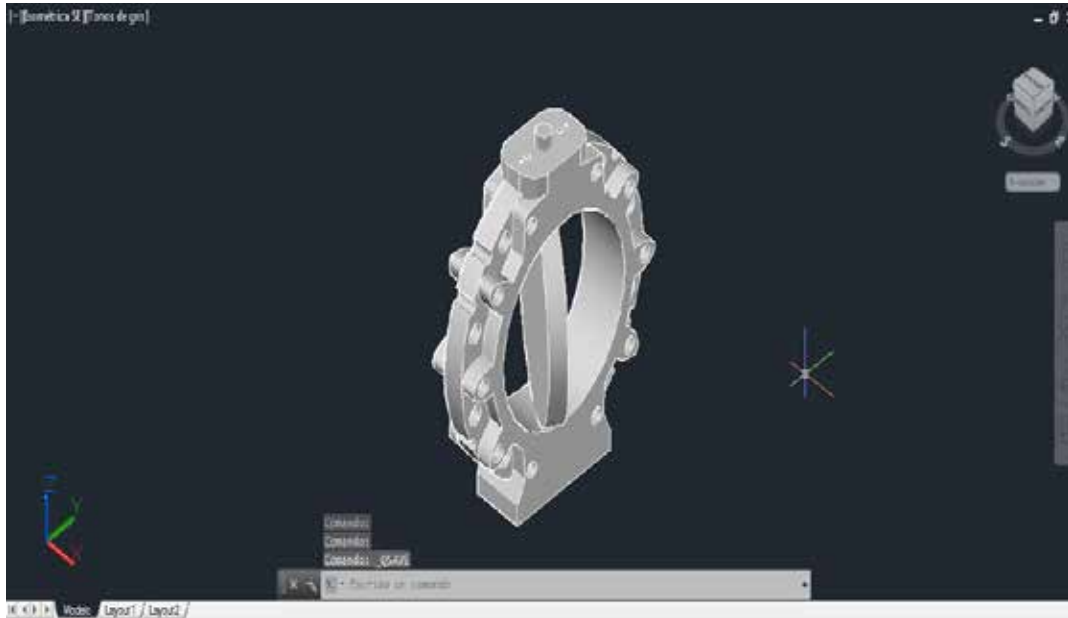


Figura 7: Dimensionamiento de la válvula mariposa.

Fuente: Sánchez (2018)

Tabla 1: Características geométricas de una válvula mariposa de doble vuelo.

Tipo	A	B	C	D	F	K	L	α	Z
	mm	mm	mm	mm	mm				
BV2F150	150	200	225	250	77	14	M12	90°	4

4.2.2 Importación de la geometría

Una vez realizado el dibujo de la válvula mediante la herramienta CAD se guarda con una extensión IGES para vectorizarlo y poder acceder a él desde un ambiente Workbench de ANSYS, destacándose que la importación debe ser del dominio fluidizado, no del sólido de la válvula. Dicho dominio fluidizado es un sólido al cual se le van a asignar propiedades de material fluido con la finalidad de discretizarlo mediante un módulo de mallado “meshing” codificando los elementos y nodos de la celda computacional donde serán ejecutados los algoritmos de solución de las ecuaciones lineales del modelo matemático que describe el flujo. En la Figura 8 se muestra el dominio fluidizado ya en el ambiente Workbench.

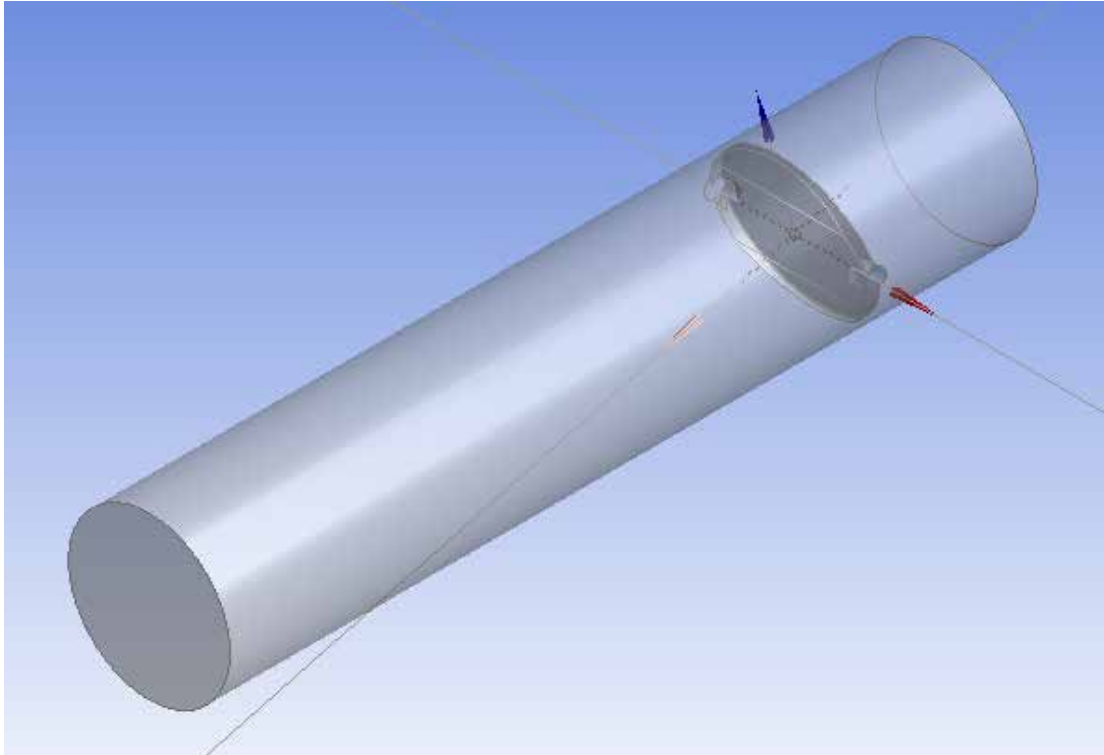


Figura 8: Dimensionamiento de la válvula mariposa (CFD).

Fuente: Sánchez (2018)

4.3 Simulación el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)

4.3.1 Selección de los modelos matemáticos.

Una vez realizada la revisión bibliográfica satisfactoria, se determinó que el modelo matemático más apropiado 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 y un modelo de turbulencia del tipo Transporte del Esfuerzo Cortante (SST por sus siglas en inglés) a fin de lograr el estudio del comportamiento de la cavitación en el campo de flujo a través de una válvula mariposa.

4.3.2 Verificación de la geometría y mallado

En la Figura 9 se muestra la geometría que representa el dominio o volumen de control del flujo que pasa a través de la válvula (dominio fluidizado), con un ángulo de apertura del obturador de 15°. Las geometrías para los ángulos de 15°, 30°, 45° y 60° son similares, presentando la única variación en el ángulo de apertura del obturador.

Se observará en la Figura 9 la zona de estudio de la tubería a la salida, la cual tiene mayor longitud que la entrada, esto se debe a que el plano P2 que es necesario para el estudio de la cavitación, se ubica a una distancia del obturador de seis veces el diámetro de la tubería, distancia recomendada para garantizar la recuperación del gradiente hidráulico.

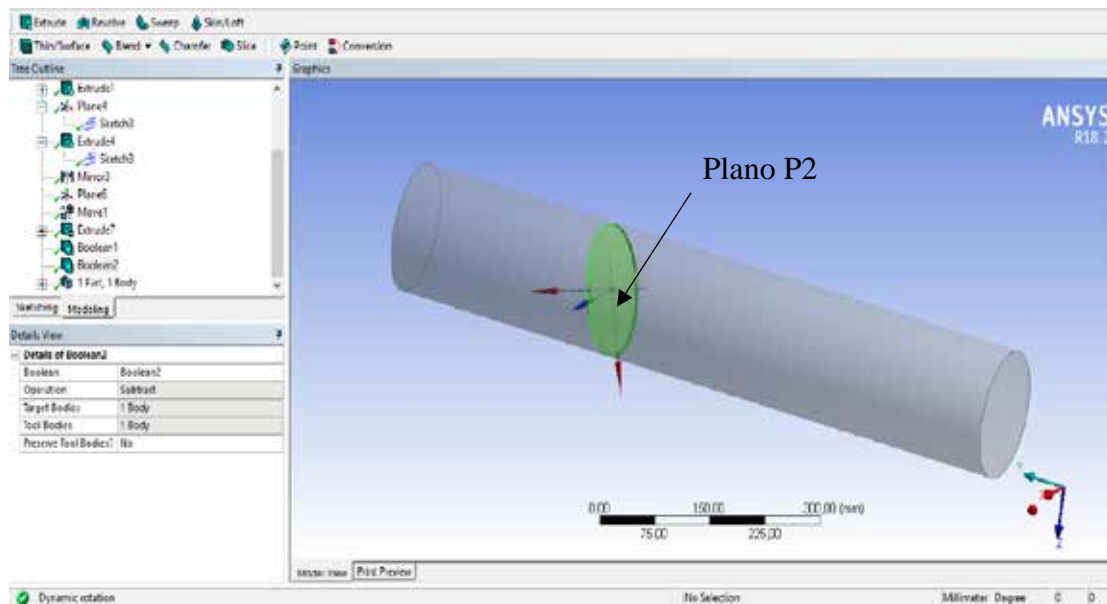


Figura 9: Importación del diseño en el software CFX.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos en la verificación de la geometría, correspondientes a los distintos ángulos de apertura del obturador simulados de la válvula mariposa. Como criterio de comparación se comparan los parámetros establecidos en la sección 2.2.15:

Chequeo de los ejes (Mínima longitud de aristas > tolerancia = 1.1 mm).

Verificación de las caras (Mínimo factor admisible < límite = 25).

Máxima distorsión (Mínimo parámetro < límite = 10).

Tabla 2: Parámetros obtenidos de la verificación de la geometría.

Ángulo	Mínima longitud de arista [mm]	Mínimo factor de caras	Máxima distorsión	Conclusión
15°	9,8303	1,2	2,85	Cumple
30°	9,8278	1,2	2,92	Cumple
45°	9,8321	1,3	3,05	Cumple
60°	9,8463	1.3	3,21	Cumple

Se observa en los valores mostrados en la Tabla 2, que todos los criterios cumplen con los límites recomendados, esto indica que el cambio en la inclinación del obturador no afecta los valores de los parámetros verificados.

De igual manera, se procede a la configuración del mallado para realizar la discretización del dominio según las premisas establecidas en The Best Practices Guidelines de ANSYS®. El programa de acuerdo a la aplicación a estudiar, propone lo que sería un mallado “ideal” como punto de partida, al que se le realizaran cambios de acuerdo a la profundidad en el estudio. Este mallado ideal consiste en una mezcla de diferentes geometrías en los elementos constitutivos de la malla, así como un tamaño estándar para dichos elementos. La primera fase del mallado consiste en la selección de las superficies de entrada y salida de la válvula, así como de lo que sería la pared de la misma. Luego de esto, se procede a la generación del mallado “ideal”.

A partir de este mallado, se modifican diversos factores que, de acuerdo al manual del programa, son necesarios para obtener un mallado más refinado y así los resultados de la simulación sean más precisos. Estos factores van desde el tamaño del elemento de la malla, hasta la calidad de los mismos. Un elevado número de elementos permite una simulación efectiva y que arroje resultados precisos. Por ello, se selecciona una intensidad relevante del mallado debido a que, de este modo, se

genera el número de elementos necesarios para una simulación correcta y precisa. Se usa la configuración de función avanzada de tamaño en las proximidades y curvaturas para capturar con precisión la geometría mientras se mantiene una tasa de crecimiento suave entre estas regiones.

En cuanto a los parámetros de tamaño de elemento de la malla, estos se configuran de tal manera que se pueda aumentar la calidad del mallado. A esta configuración se le inserta un Método de Mallado Tetraédrico, que generalmente proporciona una solución más automática con la posibilidad de añadir controles de malla para mejorar la precisión en regiones críticas. Así como también se configura un parámetro de “Inflación” en la superficie de la geometría, exceptuando las fronteras de entrada y salida del flujo con el fin de delimitar la capa límite de la geometría donde los efectos viscosos son significativos. Ahora se procede a la realización del mallado con el módulo “Mesh” del ANSYS® CFX Mesh y se puede observarse en la figura 9 que la generación del mallado con la configuración anterior, resulta de un mallado con 460006 elementos y 168377 nodos, como se muestra en la Figura 10.

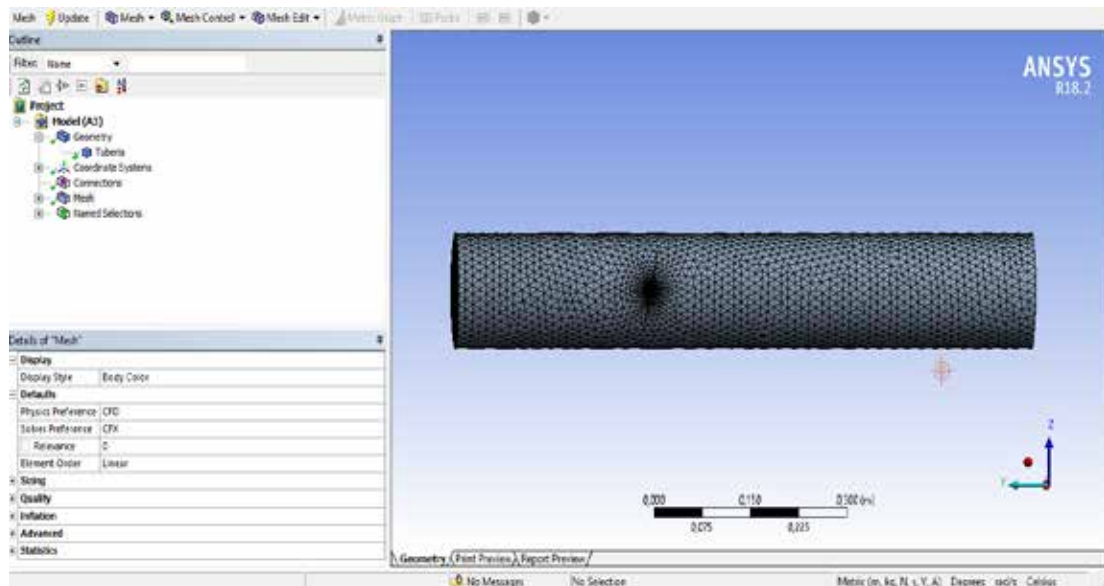


Figura 10: Configuración del mallado.

Fuente: Sánchez (2018)

Al realizarle un corte longitudinal sobre la geometría luego de la generación del mallado, como se muestra en la Figura 11, se observa la distribución de elementos en esta, destacando la tendencia a generar elementos más finos en las proximidades de la capa límite definida debido a la propiedad del módulo de Meshing de ANSYS® “Inflación” en las paredes, así como la exclusiva presencia de elementos tetraédricos, los cuales permiten no solo una más fácil resolución de las ecuaciones de conservación y modelos de turbulencia, sino que también permiten una correcta predicción del comportamiento de las variables a ser estudiadas para este tipo de estudios.

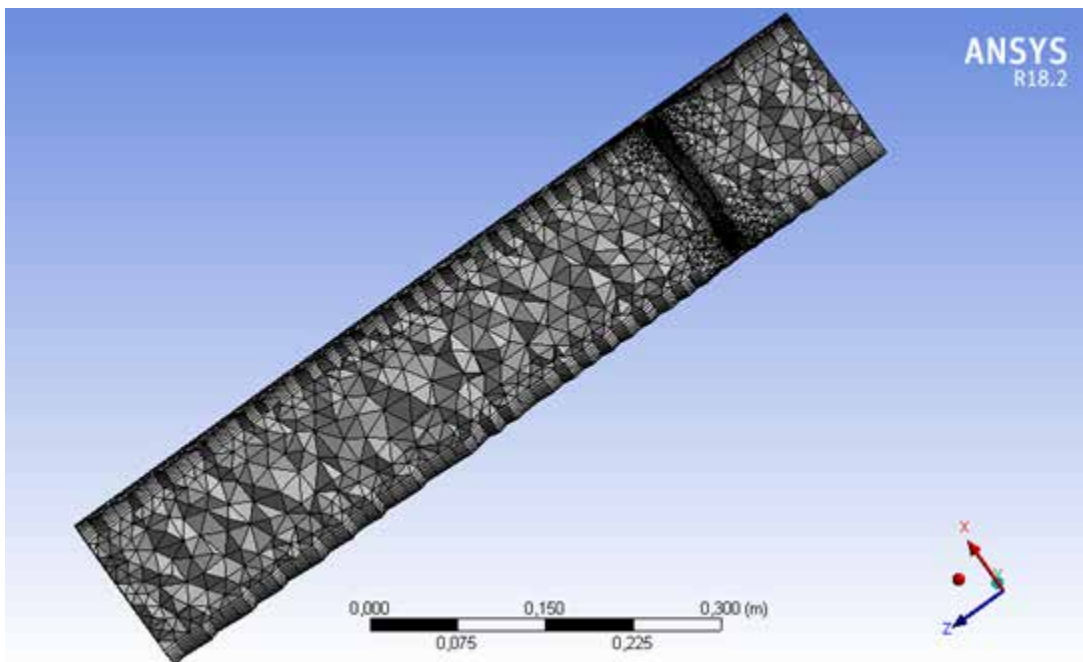


Figura 11: Corte longitudinal de la geometría.

Fuente: Sánchez (2018)

4.3.3 Generación del dominio

En esta parte, se asignan tres condiciones de borde, la primera es la entrada del flujo, llamada “Inlet”, la segunda es la condición de borde son las paredes

llamadas “Wall” ubicada en toda la superficie de dominio del diseño, la tercera condición llamada “Outlet” ubicada a la salida de la tubería.

De tal manera como se definieron las áreas principales de la válvula (entrada, salida), se definen los límites que debe tener el paso de flujo. Esto se realiza mediante la herramienta CFX – Pre de ANSYS®. En La configuración de las condiciones de borde de entrada y de salida de la válvula. En la Tabla 3, se muestran los ajustes básicos al dominio predeterminado, donde se definen importantes parámetros como lo son el tipo de dominio, fluido a manejar, morfología, presión de referencia, entre otros.

Tabla 3: Parámetros establecidos para el pre-simulador.

Opción	Configuración	Valor
Opciones Generales	Tipo de Dominio	Fluido
	Lista de Fluidos	Agua y Vapor de Agua
	Presión de Referencia	1[atm]
Modelado del Fluido	Opciones de Multifases	Modelo Homogéneo
	Opciones de Transferencia de calor	Ecuación de la Energía
	Opción de turbulencia	SST
Detalle del Fluido	Detalles del fluido	Agua
	Morfología	Fluido Continuo
	Detalles del fluido	Vapor de Agua
Par de Fluido	Morfología	Fluido Continuo
	Par de fluido	Agua y Vapor de Agua
	Transferencia de masa	Por Cavitación

4.3.3.1 Creación de condiciones de borde.

Para cada región definida en el módulo de Meshing se establece el tipo de propiedades que definen los contornos como una entrada, salida, pared, entrada y salida o establecida como un plano de simetría.

Se definirán cinco condiciones de borde: una entrada llamada “inlet”, dos paredes “default 2D Region” y “pipe wall”, una salida “outlet” y un plano de simetría “sym”.

Condición de entrada.

Se configura la condición de borde “inlet” como una condición de entrada (ver Figura 12).

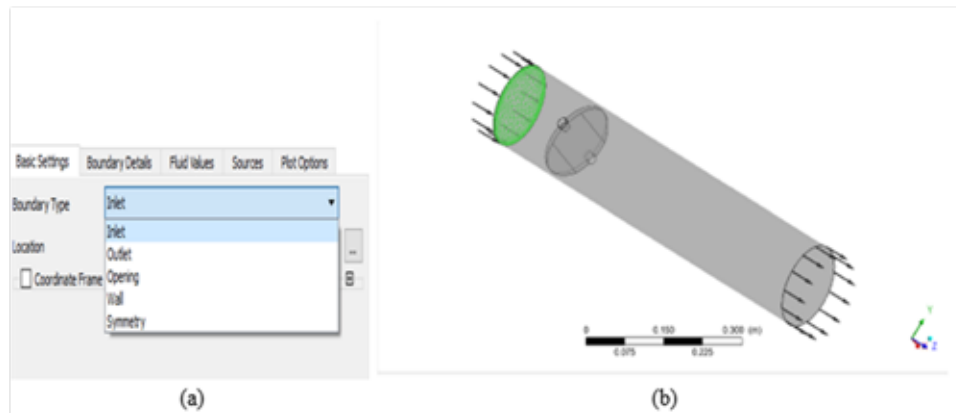


Figura 12: Configuración de la condición de borde como condición de entrada de flujo a la tubería, (a) Configuración de la región correspondiente a la entrada como una entrada “Inlet” y (b) Vista de la región correspondiente a la entrada (verde).

Fuente: Sánchez (2018)

El régimen del flujo a la entrada es subsónico, con un porcentaje arbitrario de turbulencia de 5%, preestablecido por el programa para iniciar las iteraciones del modelo de turbulencia y como propiedad característica de la condición de entrada al dominio fluidizado, se configura la presión relativa a 561922.7 Pa (81,5psia) a una temperatura de 25°C (ver Tabla 4).

Tabla 4: Configuración de las propiedades características de la condición de entrada.

Inlet-Entreda	
Presión	561922.7[Pa]
Presión Relativa	Presión Estática
Temperatura estática	25°C
Régimen de Flujo	Subsónico

Condición de salida.

El régimen de flujo a configurar en la salida (ver Figura 13), es subsónico y la propiedad característica de masa y momento a la salida se configura como promedio de presión en la salida con la intención de variar este parámetro (ver Tabla 5), manteniendo constante la presión a la entrada y obtener las simulaciones respectivas a diferentes valor

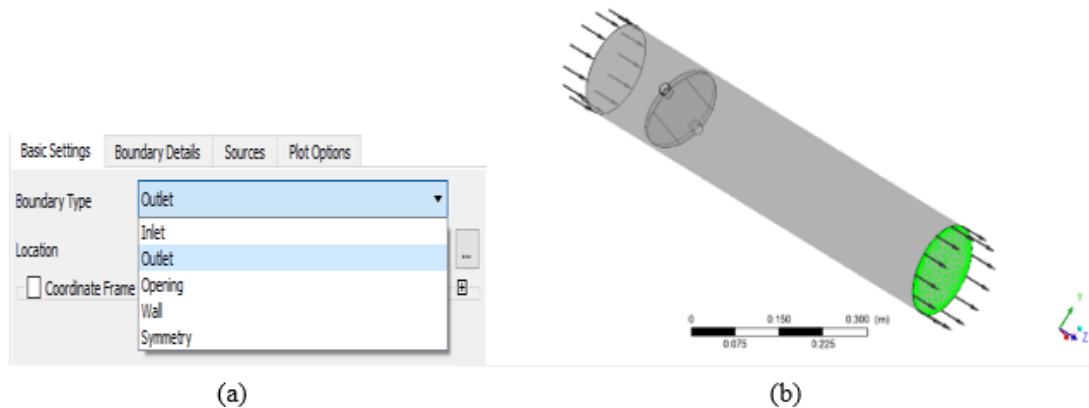


Figura 13: Configuración de la condición de borde como de salida, (a) configuración de la región correspondiente a la salida como “Outlet”, y (b) vista de la región correspondiente a la salida (verde).

Fuente: Sanchez (2018)

Tabla 5: Configuración de las condiciones de salidas.

Outlet-Salida	
Presión	P
Régimen del Fluido	Subsónico
Presión Relativa	3166[Pa]-101325[Pa]

Configuración del dominio.

Luego, se puede apreciar en la Figura 14, la configuración de los modelos de fluidos, líquido y vapor de agua, presión de referencia, condiciones de flotabilidad y

régimen estacionario para el flujo. Así como también se escoge las paredes del dominio como adiabáticas y el modelo de turbulencia como el SST (ver tabla 6).

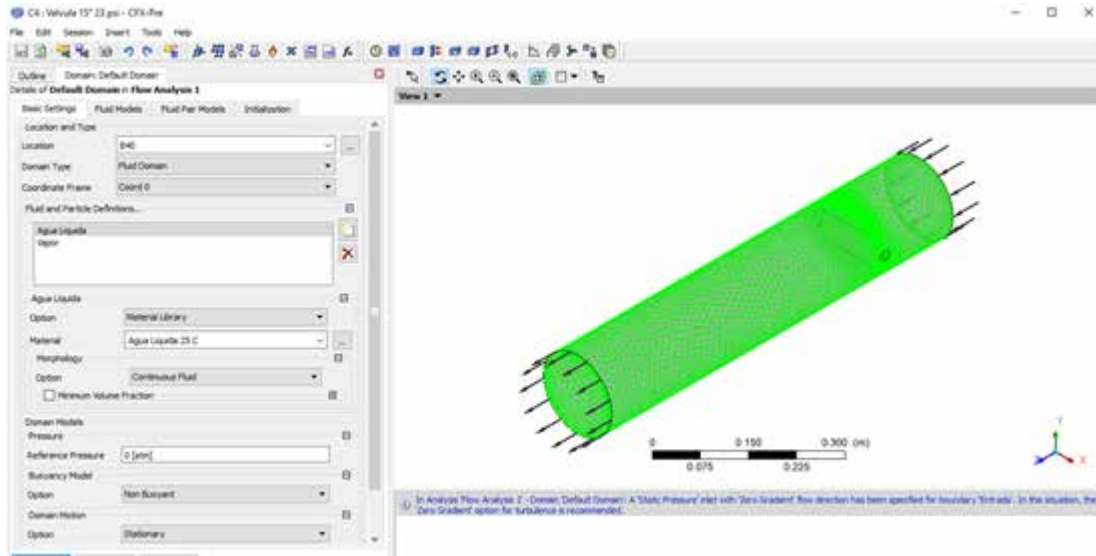


Figura 14: Configuración del dominio.

Fuente: Sánchez (2018)

Tabla 6: Configuración del dominio

Wall-Paredes del Dominio	
Pared	Adiabática
Modelo de Turbulencia	SST

4.3.4 Configuración de la herramienta de cálculo

La configuración de la herramienta de solución “Solver” (ver Figura 15 donde se muestra el “árbol de trabajo” referente al dominio a configurar), es en donde se establecen todos los criterios correspondientes a la convergencia de la simulación, y los que tendrá en cuenta el programa a la hora de realizar los cálculos. Para esto se ingresa en el panel de control del Pre – CFX™. En la Figura 16 se muestran las especificaciones del número de iteraciones máximas a realizar, así como el valor mínimo residual o RMS. La simulación entonces convergerá al momento de cumplirse primero cualquiera de las dos premisas mencionadas anteriormente.

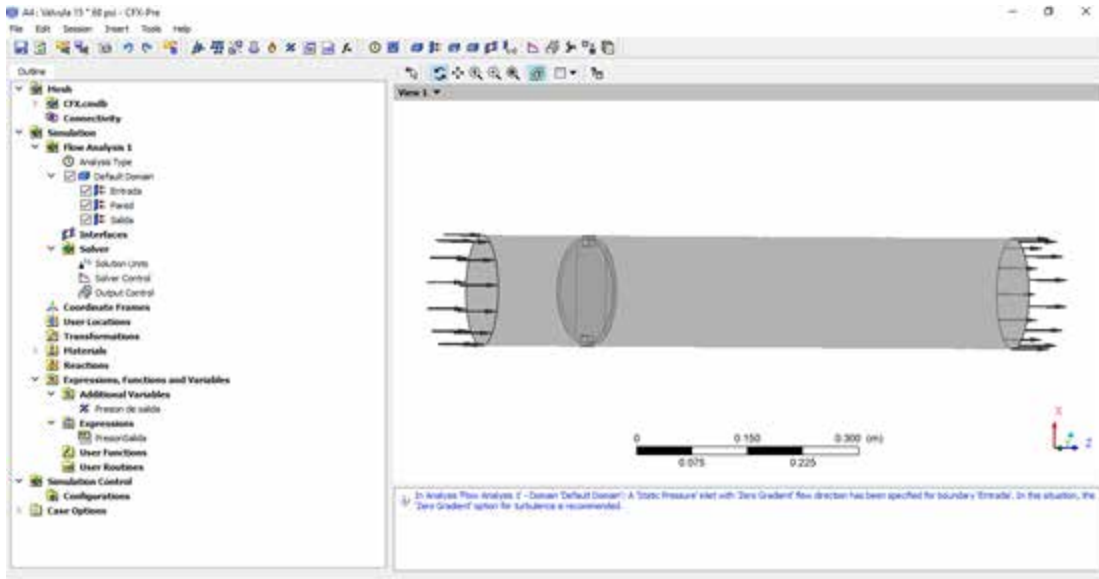


Figura 15: Configuración de la herramienta “solve”.
 Fuente: Sánchez (2018)

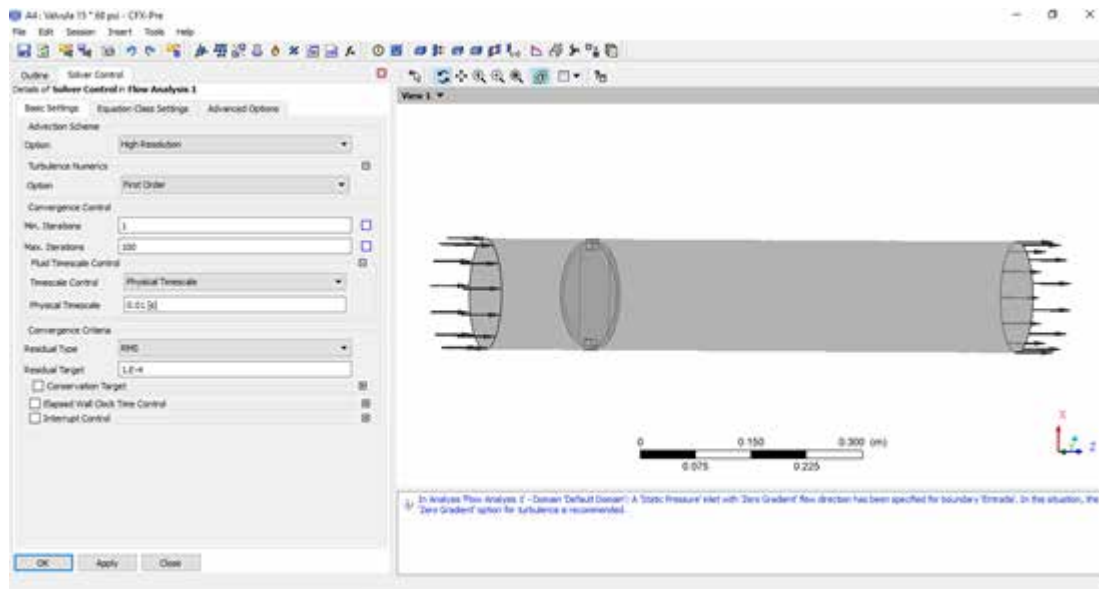


Figura 16: Parámetros de trabajo del dominio de la válvula.
 Fuente: Sánchez (2018)

4.4 Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático

4.4.1 Obtención de los resultados

Los datos obtenidos se agrupan en forma de gráficos, los cuales representan el comportamiento de las curvas de conservación de masa y momento, así como los modelos de turbulencia, presentados principalmente por diagramas bidimensionales de contornos y curvas de posición a partir de líneas de corriente para cada uno de los parámetros o variables que definen los estados o condiciones en los que se realizó la geometría de la válvula, tal como sigue:

Curvas de la variación de la velocidad del fluido en la dirección del flujo

Curvas de la variación de la presión estática del fluido en la dirección del flujo

Chequeo de cavitación mediante técnicas de visualización de contornos de la fracción de volumen líquido/vapor del campo de flujo.

4.4.2 Convergencia de las simulaciones

Mediante el uso de un procesador de ecuaciones incluido en el software ANSYS® CFX, se procede a la resolución de las ecuaciones. Se fija un valor de RMS de 0,0001 (1×10^{-5}) como criterio de convergencia, el cual es un valor que proporciona una alta precisión en los resultados de una simulación y es extremadamente conservador para las recomendaciones del fabricante del software de CFD las cuales para problemas relacionados de ingeniería sugiere 0,0001 (1×10^{-4}); mientras que se selecciona un número máximo de 100 iteraciones, esto con la finalidad de buscar que el objetivo residual sea el criterio principal de convergencia.

La finalidad del análisis CFD es resolver ecuaciones de conservación (conservación de la masa, cantidad de movimiento, modelo de turbulencia, ecuación de la energía, modelos adicionales para cerrar el sistema de ecuaciones, Rayleigh – Plesset, entre otras). Por lo tanto, el análisis de las curvas de conservación para todos los estados de la simulación es vital para asegurar una correcta simulación. Se presenta en la Figura 17 el resultado de la simulación referido al comportamiento de

las curvas de convergencia para las leyes de conservación de masa y momento, a una presión de salida de 3166 Pa. Observándose una marcada tendencia a la reducción de los valores RMS de los residuos por iteración, donde a partir de las correspondientes iteraciones número 35, ya existía un valor por debajo de 1×10^{-4} y terminando el proceso en la iteración máxima de 100 (prefijada).

En la Figura 18, se puede apreciar que la convergencia de las ecuaciones para el modelo de turbulencia y frecuencia residual también fue lograda, anticipadamente. Este análisis es análogo para todos los estados de estudio, debido a que la simulación se comporta de manera similar, obteniendo curvas de convergencia con resultados equivalentes.

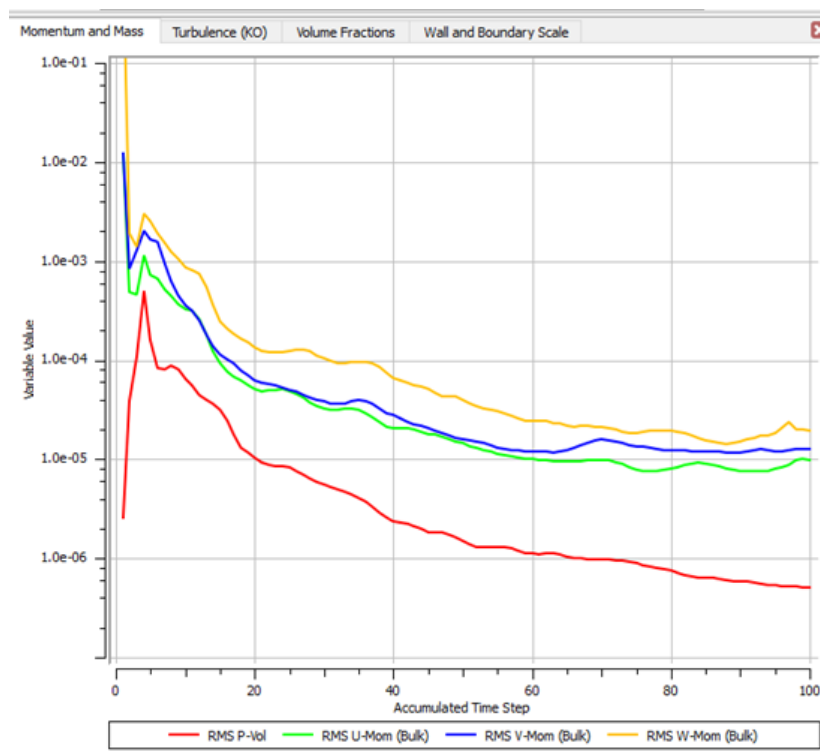


Figura 17: Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para P= 3166 Pa en la malla que corresponde al ángulo de apertura 30°

Fuente: Sánchez (2018)

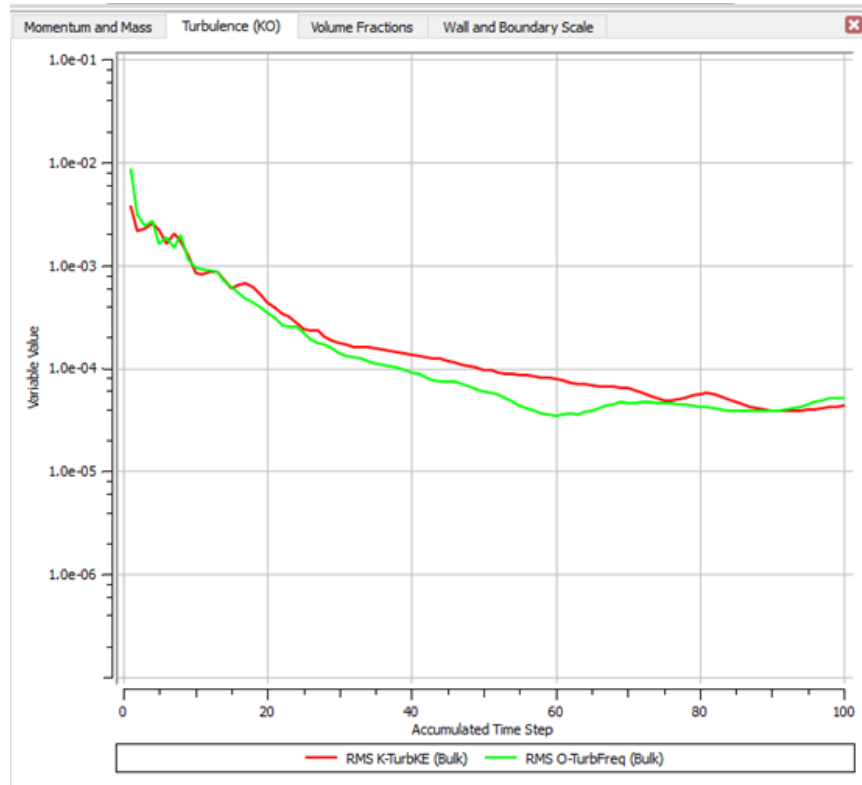


Figura 18: Representación gráfica de convergencia del modelo de Turbulencia SST para P=3166Pa en la malla que corresponde al ángulo de apertura 30°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Tabla 7, se encontrarán los valores residuales de convergencias, al final de las 100 iteraciones, con una apertura de 30° grado.

Tabla 7: Valores residuales RMS de la convergencia para un ángulo correspondiente de apertura 30°

convergencia	U-Mom	V-Mom	W-Mom	P-Vol
P ₂ [Pa]	RMS	RMS	RMS	RMS
468000	2.3E-05	3.0E-05	1.0E-04	3.2E-06
312717	2.9E-05	4.2E-05	9.9E-05	4.4E-06
158000	1.2E-04	1.6E-04	4.9E-04	8.8E-04
3166	9.9E-05	1.3E-04	1.9E-04	5.1E-06

4.4.3 Resultados del pots-procesamiento

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos de la convergencia de las iteraciones de las ecuaciones de gobierno aplicadas al dominio fluidizado. Así como también, se muestran las propiedades obtenidas de las simulaciones necesarias para el estudio de la cavitación en el campo de flujo a través de la válvula, como son los valores de la presión a la entrada del dominio (P_1), velocidad de entrada (V_1), presión a la salida del dominio (P_2), caudal volumétrico de agua (Q) y diferencia neta de presión (P_{net}). En la Tabla 8 se muestran los resultados para la malla correspondiente al ángulo de apertura de 30° .

Tabla 8: Resultados del post-procesamiento de la malla de 30°

P_1 [Pa]	V_1 [m/s]	P_2 [Pa]	Q [m ³ /s]	P_{net} [Pa]
561922.7	1,920	468000	0,1430	93079,26
561922.7	2,940	312717	0,0673	251658,74
561922.7	3,613	158000	0,0339	403343,46
561922.7	3,666	3166	0,0183	558751,35

El valor de sigma presentado en la Tabla 9, es calculado a partir de la ecuación 1, tomando como constante $P_v = 3,44831$ kPa de los datos experimentales disponibles, de la siguiente manera:

$$P_{net} = P_1 - P_2$$

$$P_{net} = 561922.7 - 468000 = 93079,26$$

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{P_{net}}$$

$$\sigma = \frac{561922.7 - 3448.31[P_a]}{93079,26[P_a]} = 5.781606667[P_a]$$

Los valores de las constantes C_v , C_v/d^2 , y C_d , se obtienen por las ecuaciones 3,4 y 5, respectivamente y también se muestran en la Tabla 9.

$$C_d = \frac{1,920}{\sqrt{\frac{2(93079,26)}{997} + (1,920)^2}} = 0,139$$

$$K = \frac{2(93079,26)}{997(1.920)^2} = 50.65$$

$$C_v = \frac{0.143m^3 \text{ s}^{-1}}{\sqrt{\frac{93079.26 \text{ Pa}}{1}}} = 0.0004687$$

$$\frac{C_v}{d^2} = \frac{0.143m^3 \text{ s}^{-1}}{(0.15m)^2 \sqrt{\frac{93079.26 \text{ Pa}}{1}}} = 0.021$$

Tabla 9: Resultados del post-procesamiento y coeficiente para la malla de 30°

Sigma	V1[ms-1]	C_v	C_v/d²	C_d
5,781606667	1.920	0,0004687	0.021	0,139
2,138402466	2.94	0,000134	0.00596	0,129
1,334216923	3.613	0,0000533	0.00237	0,128
0,963125494	3.666	0,0000245	0.00108	0,107

En la Figura 19, se representa gráficamente los valores del coeficiente de descarga (C_d) en función del nivel de cavitación (), sin embargo esta curva depende de la geometría de la válvula, ya que nos permite la comparación directa de la cavitación en el accesorio para un ángulo de apertura en el obturador de 30°, donde observaremos como ocurre un cambio de la generación de vapor de agua dentro de la tubería a medida que va incrementando el nivel de cavitación, donde el flujo sufre una aceleración en el obturador de la válvula.

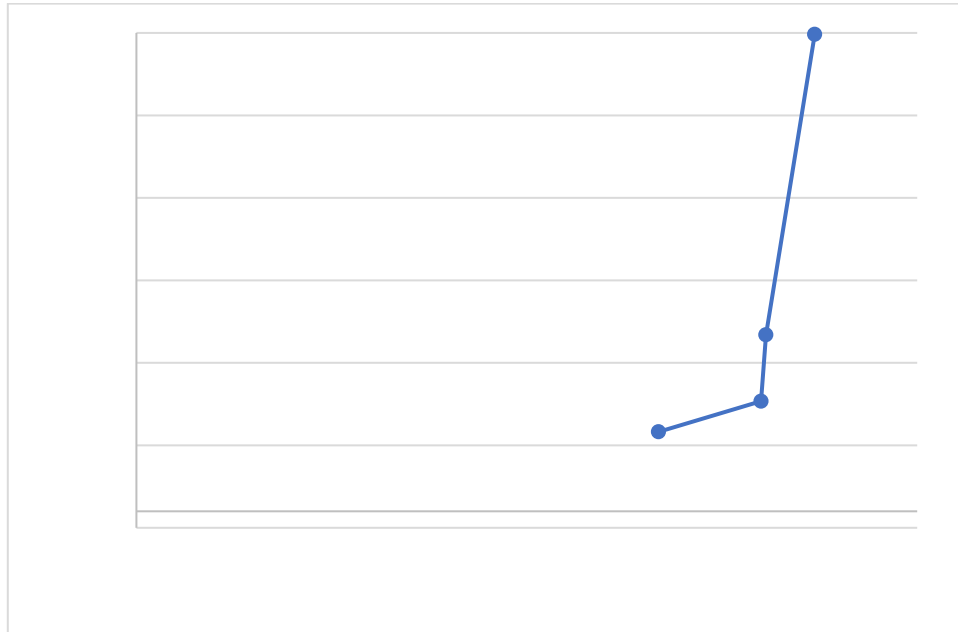


Figura 19: Evaluación de cavitación (σ) vs Coeficiente de descarga (C_d).
 Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 20, se presenta gráficamente el comportamiento del coeficiente de flujo (C_v) en función del nivel de cavitación (σ) para una apertura de 30° del obturador de la válvula, se observa como la curva se solapa, por lo que se estima que al aumentar el coeficiente de flujo del fluido en la tubería podemos observar donde ocurre un cambio del incremento de la generación de vapor, así como también podemos cuantificar cuanta cantidad de flujo de fluido pasa alrededor del obturador, esto se debe a que el comportamiento de la curva no depende de la geometría de la válvula.

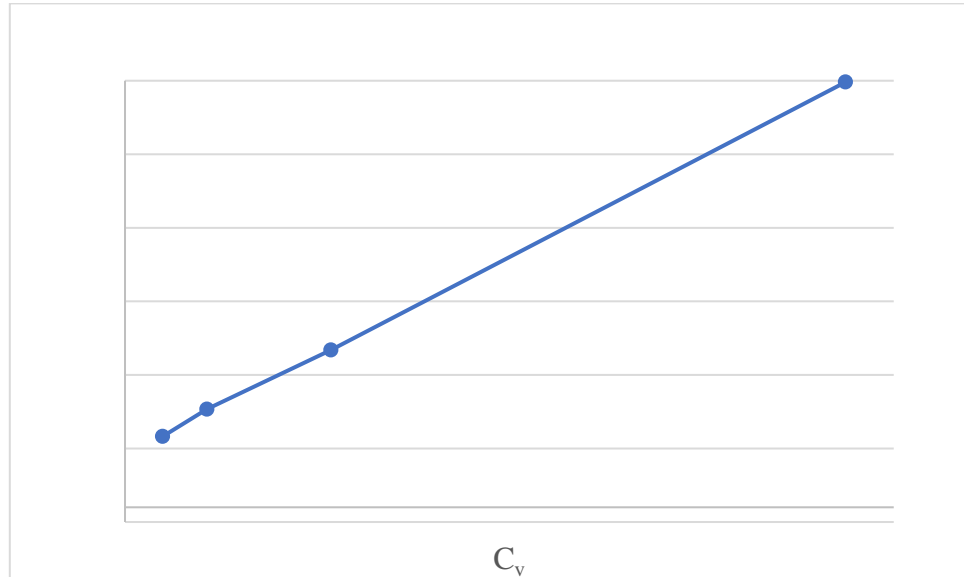


Figura 20: Evaluación de cavitación () vs Coeficiente de flujo (C_v).

Fuente: Sánchez (2018)

4.4.5 Visualización de resultados

Se presentan los resultados obtenidos a través de contornos de presión, velocidad y fracción de volumen de vapor en el plano de simetría del dominio estudiado.

4.4.5.1 Estudio del campo de flujo para un ángulo de apertura de 15°

En la Figura 21, se muestra la fracción de volumen de vapor a diferentes presiones de salida (P_2) para la malla a 15° de apertura, se observa en el plano simétrico la gran formación de burbujas para una presión $P_2=3166 \text{ Pa}$, donde se puede observar Figura 21 (d).

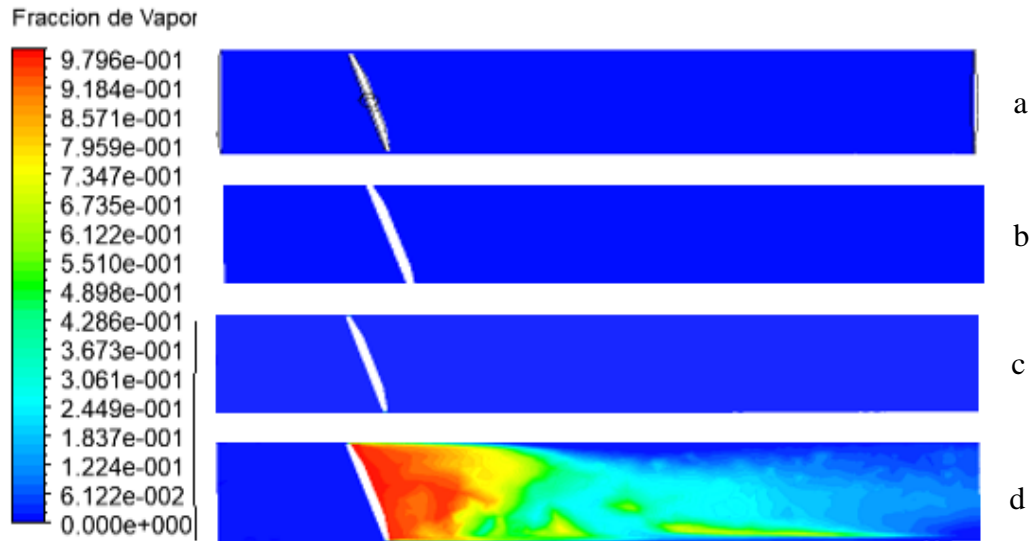


Figura 21: Fracción de Volumen de vapor sobre el plano de simetría a 15° de apertura en el obturador (a) $P_2= 468000$ Pa, (b) $P_2= 312717$ Pa, $P_2 =158000$ Pa y (d) $P_2= 3166$ Pa

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 22. se muestran los perfiles de presión sobre el plano de simetría en la malla de 15°, se puede observar para los resultados, la caída de presión al pasar a través de la zona de estrangulación y su recuperación aguas abajo en la tubería. En la Figura 22. (d), se puede observar que la presión más baja, presión de vapor, se encuentra justo después del obturador de la válvula.

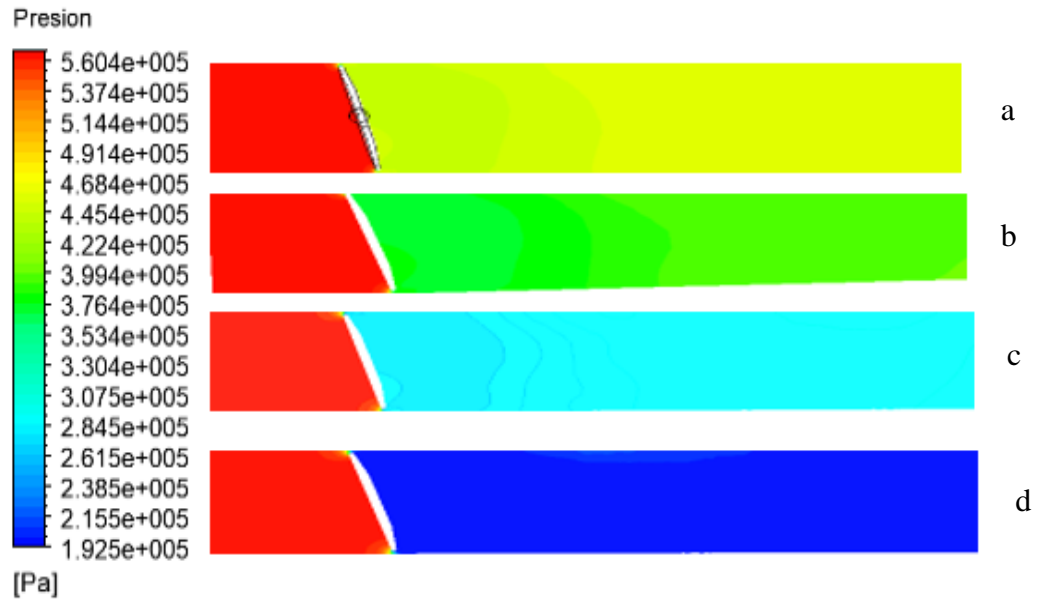


Figura 22: Presión absoluta sobre el plano de simetría a 15° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa, (d) $P_2=3166$ Pa
 Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 23. se muestran los perfiles de velocidad sobre el plano de simetría para la malla de 15°, se puede observar como la menor velocidad (regiones de color azul), se encuentra ubicado en la superficie posterior del obturador, siendo la pared de la tubería, la región de mayor velocidad (regiones de color verde).

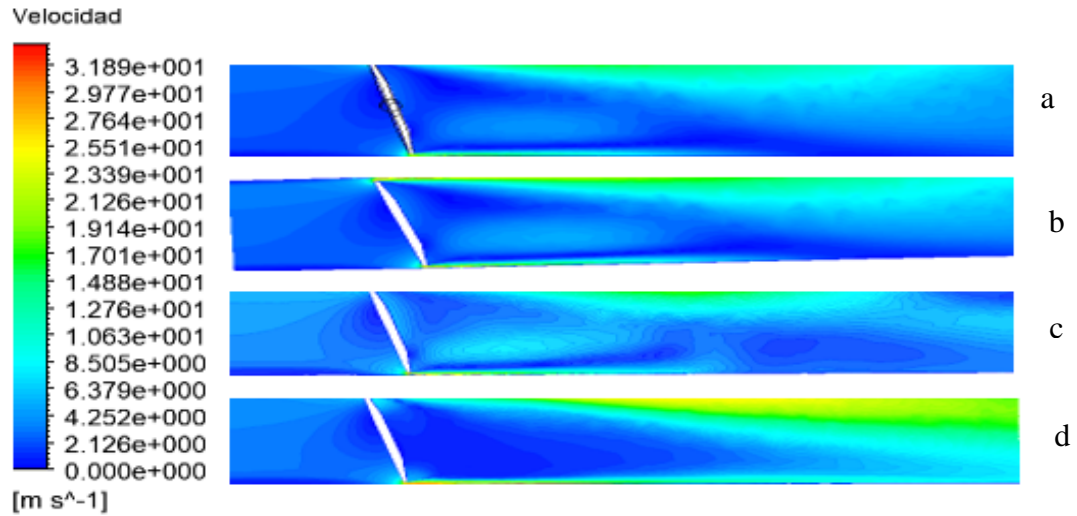


Figura 23: Perfil de Velocidad sobre el plano de simetría a 15° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa y (d) $P_2=3166$ Pa.

Fuente: Sánchez (2018)

4.4.5.2 Estudio del campo de flujo para un ángulo de apertura de 30°

En la Figura 24., se muestra la fracción de volumen de vapor a diferentes Presiones de salida (P_2), para la malla a 30° de apertura, se observa que la mayor concentración de vapor se forma en la superficie aguas abajo del obturador de la válvula, y que la formación de las burbujas de vapor comienza a alrededor de $P_2=3.166$ kPa.

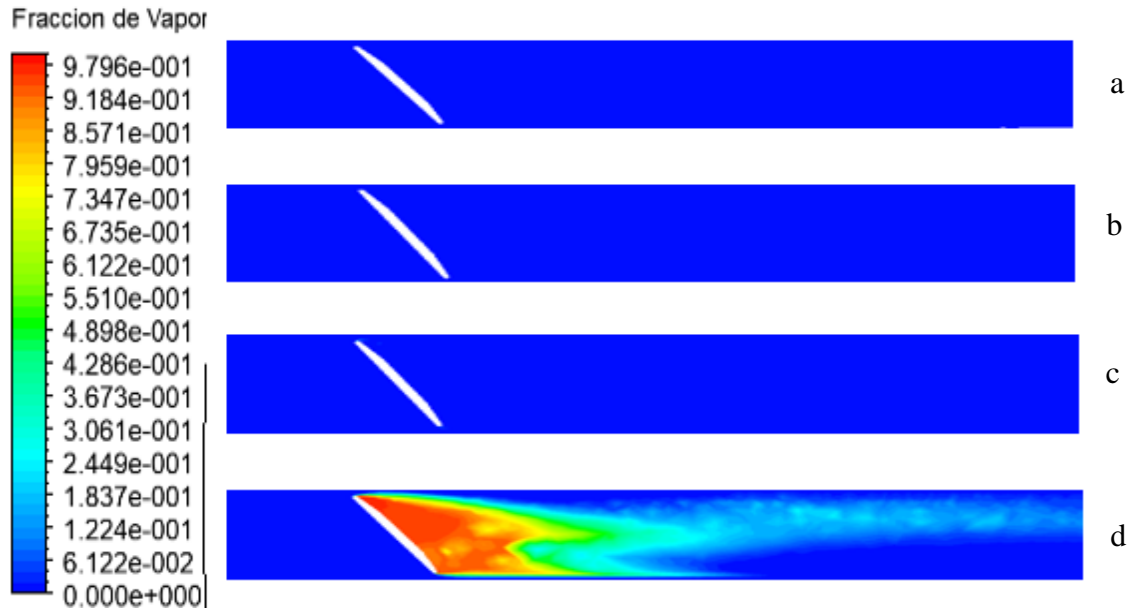


Figura 24: Fracción de Vapor sobre el plano de simetría a 30° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa, (d) $P_2=3.166$ Pa

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 25(c), se observa que la presión más baja, presión de vapor, comienza a presentarse en la superficie posterior del obturador de la válvula, en el extremo que tiene el primer contacto con el flujo.

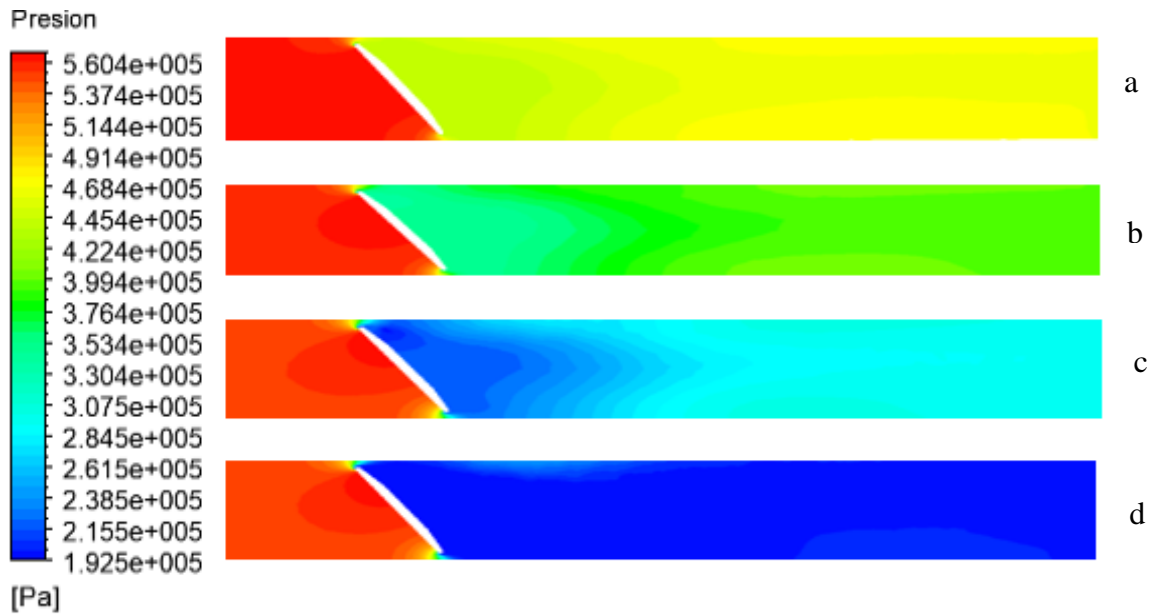


Figura 25: Presión Absoluta sobre el plano de simetría a 30° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa, (d) $P_2=3166$ Pa.
 Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 26. se observan los perfiles de velocidad sobre el plano el plano de simetría para la malla de 30°, se puede observar que las regiones con mayor velocidad (zonas de color rojo), se encuentran próximas a la pared inferior de la tubería y que a bajo rango de presión, se presentan zonas donde el fluido circula a baja velocidad o se mantiene en reposo (zonas de color azul oscuro), en la superficie posterior o aguas abajo, del obturador de la válvula.

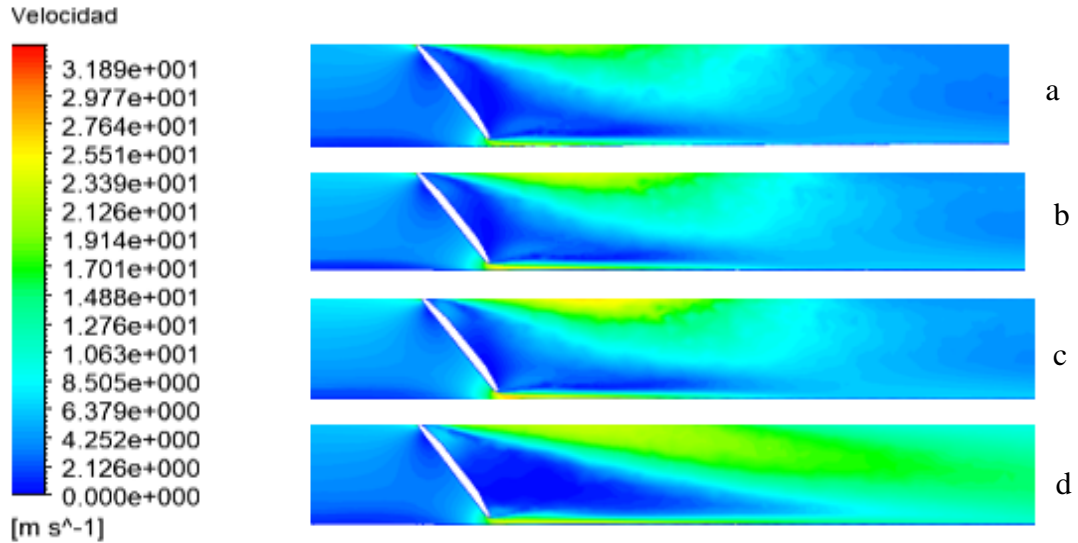


Figura 26: Perfil de velocidad sobre el plano de simetría a 30° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa, (d) $P_2=3.166$ Pa.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 27, se muestra la fracción de volumen de vapor para la malla de 45° de apertura del obturador, se observa que la mayor concentración de vapor se forma en el extremo cuando más alejado esta de la entrada del flujo y que la formación de las burbujas de vapor comienza a alrededor de $P_2=158000$ Pa.

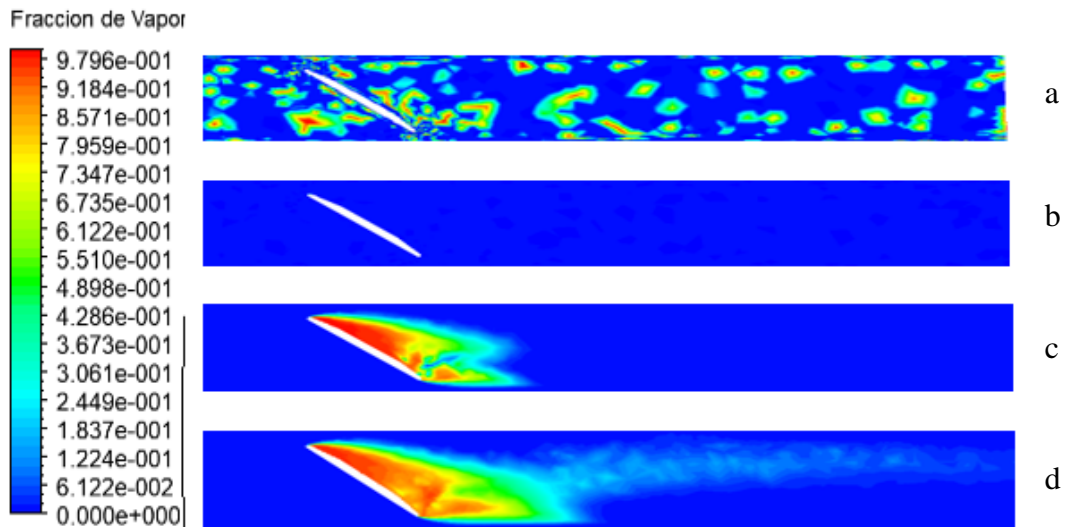


Figura 27: Volumen fracción sobre el plano de simetría a 45° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa y (d) $P_2=3166$ Pa.

Fuente: Sánchez (2018)

4.4.5.3 Estudio del campo de flujo para un ángulo de apertura de 45°

Tomando en cuenta los resultados presentados en las Figuras 27, el aumento del cavitación, esto es debido a que el caudal volumétrico necesario para originar el cambio de presión es mayor para un aumento del ángulo de apertura, por lo que, aunque el cambio de presión sea menor, la cantidad de energía necesaria para producir ese cambio de presión, hace al fluido sensible a cavitación.

En la Figura 28(c), se observa que la presión más baja, presión de vapor, comienza a presentarse en la superficie posterior del obturador de la válvula, en el extremo más alejado a la entrada del flujo.

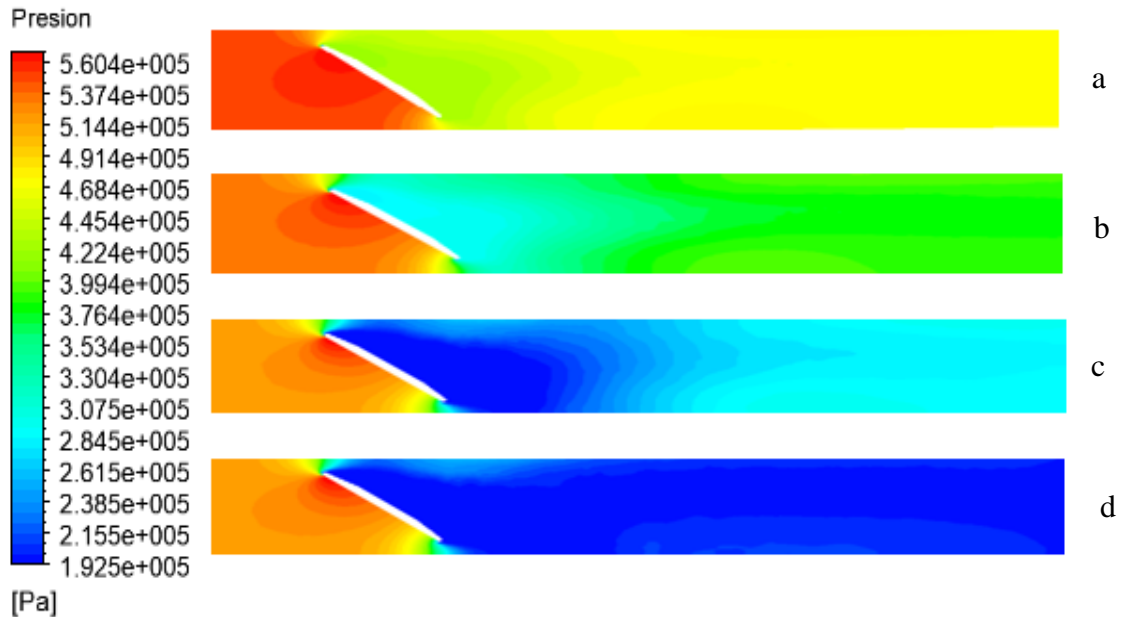


Figura 28: Presión absoluta sobre el plano de simetría a 45° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa, (d) $P_2= 3166$ Pa.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 29. se muestran los perfiles de velocidad sobre el plano de simetría para la malla de 45°, se observa que la región de mayor velocidad (zonas de color rojo o rojizo), se encuentra próximas a la pared superior de la tubería, esto se debe a la geometría del obturador de la válvula.

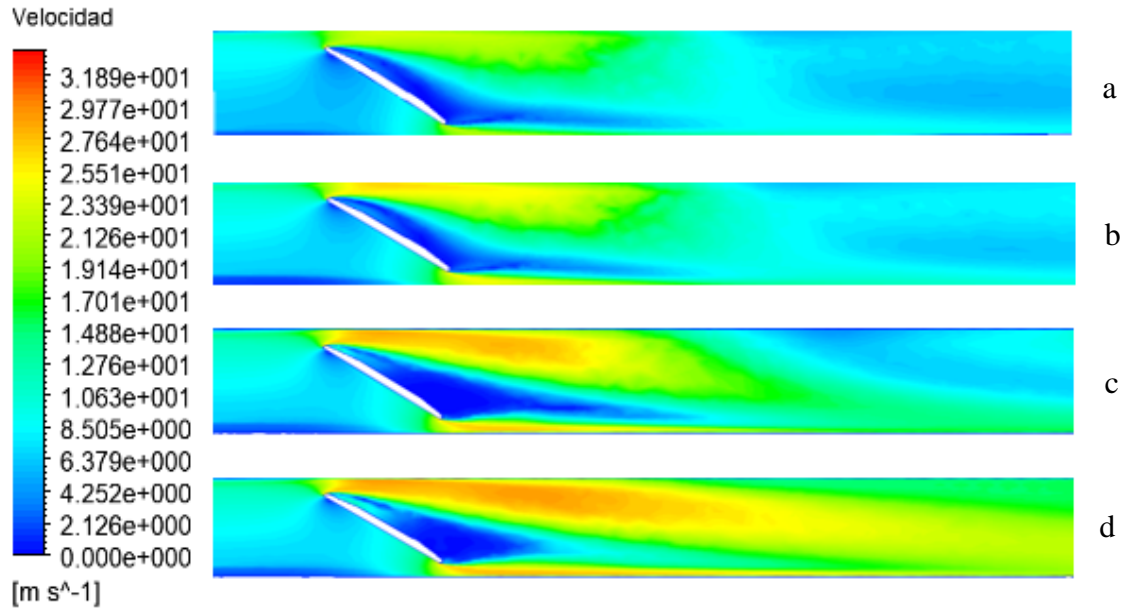


Figura 29: Perfil de velocidad sobre el plano de simetría a 45° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000\text{Pa}$, (b) $P_2=312717\text{ Pa}$, (c) $P_2=158000\text{ Pa}$ y (d) $P_2=3166\text{ Pa}$.

Fuente: Sánchez (2018)

4.4.5.4 Estudio del campo de flujo para un ángulo de apertura de 60°

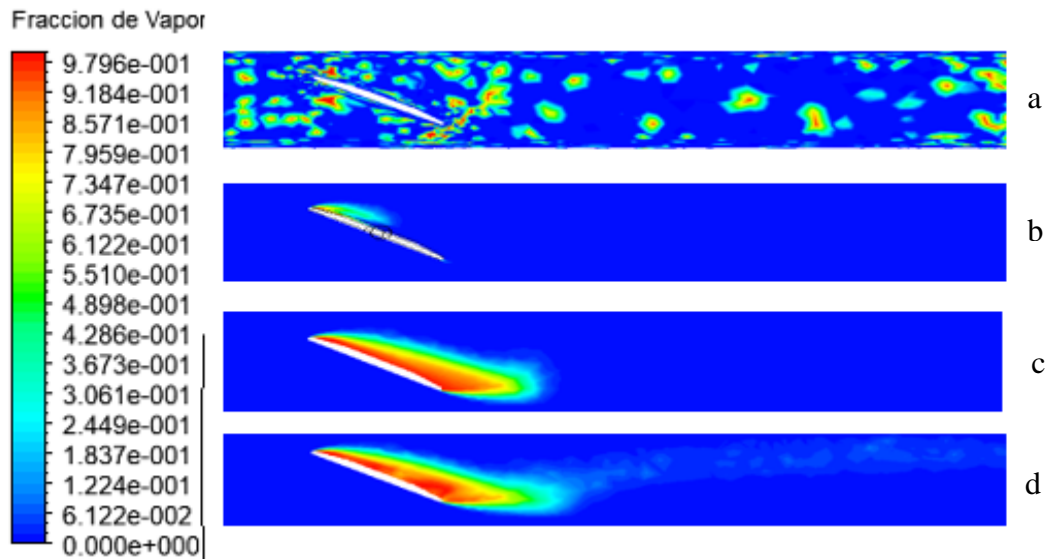


Figura 30: Volumen fracción sobre el plano de simetría a 60° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa y (d) $P_2=3166$ Pa

Fuente: Sánchez (2018)

En la figura 30, se muestra la fracción de volumen de vapor a diferentes presiones de salida (P_2), para la malla a 60° de apertura, se observa que la mayor concentración de vapor se forma en la superficie aguas abajo del obturador de la válvula, y que la formación de las burbujas de vapor comienza a alrededor de $P_2=312717$ Pa, figura 4.40 (d).

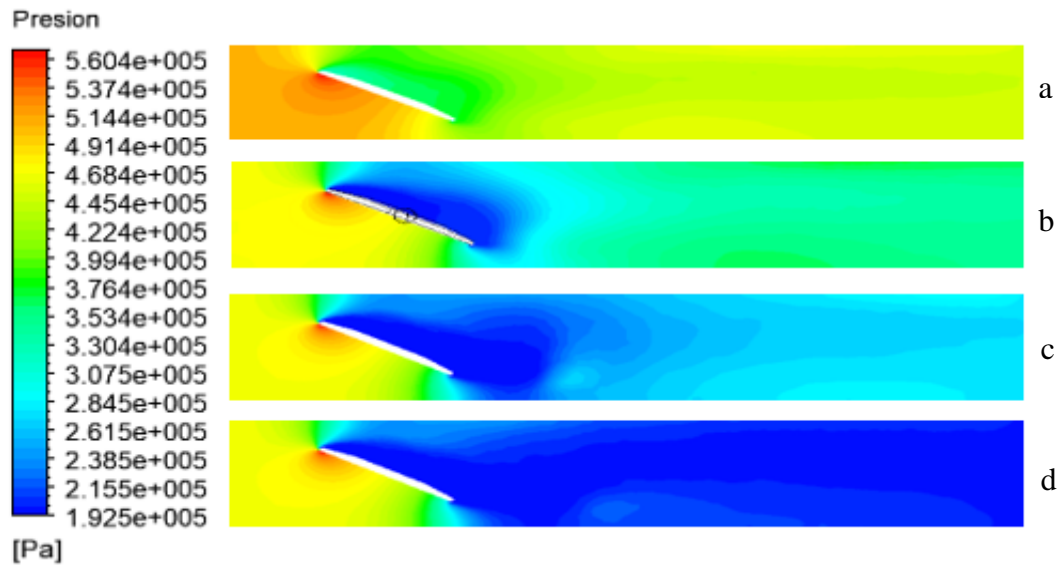


Figura 31: Presión absoluta sobre el plano de simetría a 60° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000$ Pa, (b) $P_2=312717$ Pa, (c) $P_2=158000$ Pa, (d) $P_2= 3166$ Pa.
 Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 31 (d), se observa que la presión más baja, presión de vapor, comienza a presentarse en la superficie posterior del obturador de la válvula, en el extremo que tiene el primer contacto con el flujo.

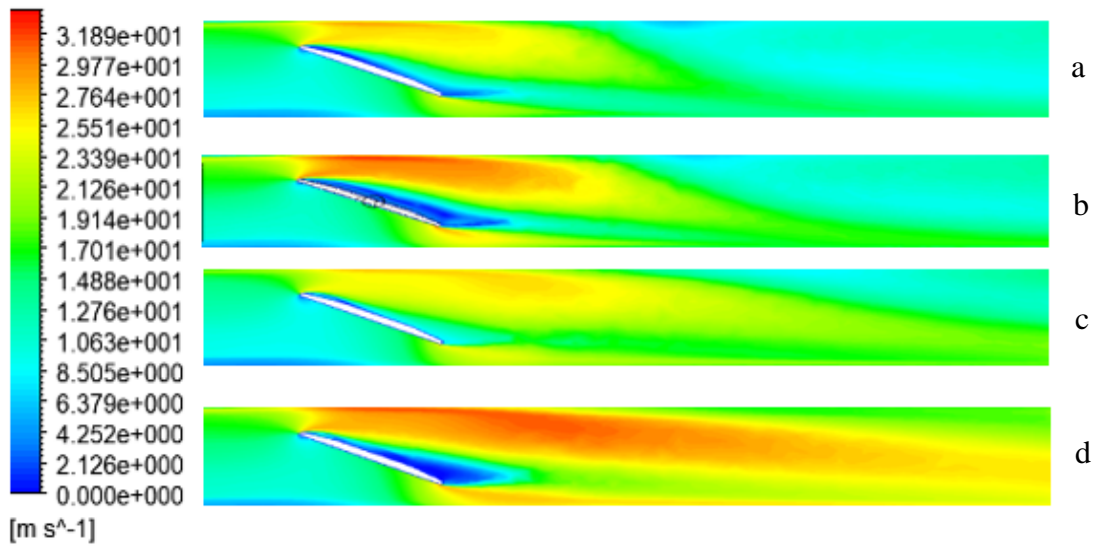


Figura 32: Perfil de velocidad sobre el plano de simetría a 60° de apertura en el obturador (a) $P_2=468000\text{Pa}$, (b) $P_2=312717\text{ Pa}$, (c) $P_2=158000\text{ Pa}$ y (d) $P_2=3166\text{ Pa}$.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 32 se observan los perfiles de velocidad sobre el plano el plano de simetría para la malla de 60°, se puede observar que las regiones con mayor velocidad (zonas de color rojo), se encuentran próximas a la pared superior de la tubería y que a bajo rango de presión, Figura 32 (b), y 32 (d), se presentan zonas donde el fluido circula a baja velocidad o se mantiene en reposo (zonas de color azul oscuro), en la superficie posterior o aguas abajo, del obturador de la válvula.

4.5 Comportamiento de las líneas de flujo y de vapor de agua en el dominio fluidizado.

Para el análisis de las líneas de flujo y del vapor de agua que se generan alrededor de la válvula, depende de la variación de presión y de la posición del ángulo del obturador. se puede decir que dicha variación de cada una de ellas dependerá de la trayectoria del flujo desde el plano de entrada del dominio hasta la salida, en la Figura 28 observares sus resultados del flujo para un ángulo de apertura de 15°.

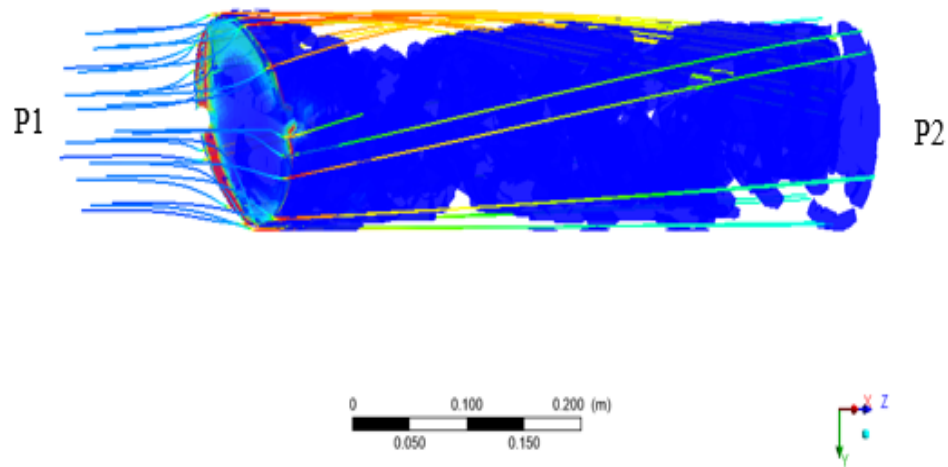


Figura 33: Comportamiento de las líneas de flujo y generación del vapor de agua.

Fuente: Sánchez (2018)

Donde observaremos en la figura 33, como el extremo del obturador de la válvula, tiene el primer contacto con el flujo en su superficie frontal que se encuentra sometida a una presión de entrada P_1 (561922.7 Pa), menor que la presión de salida P_2 (3166 Pa), lo cual representa un concentrador de esfuerzo en la superficie del obturador de la válvula, donde se encuentra sometida la cavitación, de esta forma se genera el vapor de agua (color azul) en toda su superficie.

4.5.1 Comportamiento de la generación de vapor en la trayectoria del flujo de fluido.

En la Figura 34, se muestra la generación de vapor que ocurre a lo largo de la tubería luego de pasar el obturador de la válvula. El fenómeno de cavitación no solo se caracteriza por la aparición de burbujas cuando la presión en el seno del fluido cae por debajo de la presión de vapor, sino que también es evidenciada por la propagación de ondas de baja presión que intensifican la generación de vapor, pero estas ondas se expanden a medida que el coeficiente de flujo de la válvula aumenta y

la generación de vapor disminuye. Dicho efecto está particularmente descrito por contornos de vapor en la figura 34.

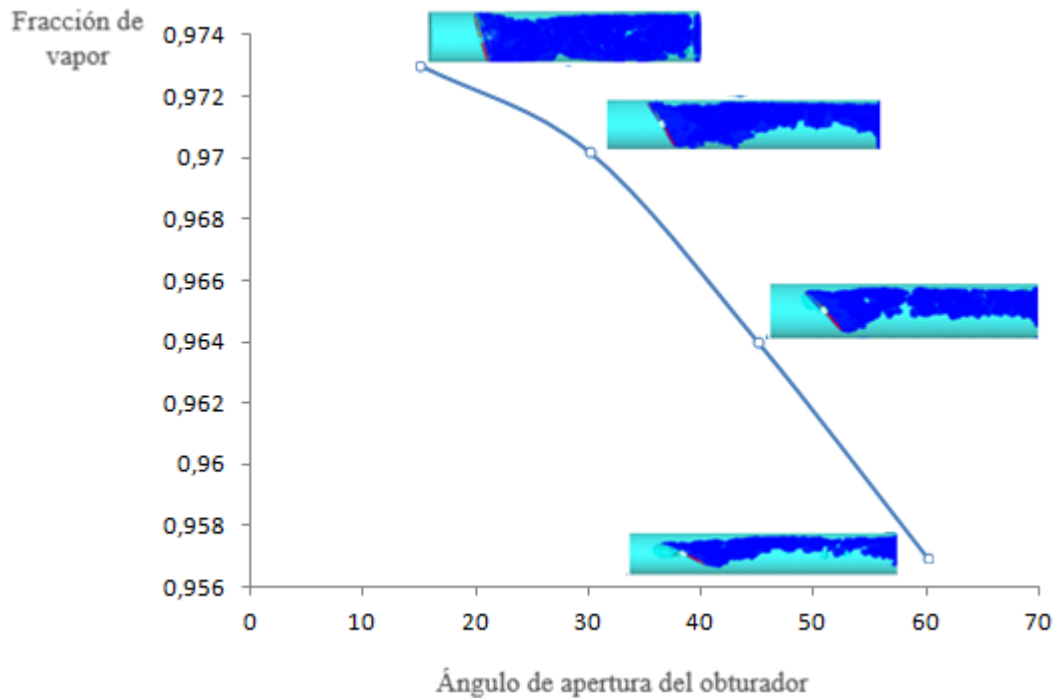


Figura 34: Generación de vapor alrededor del obturador en función de la fracción de vapor y el ángulo de apertura del obturador.

Fuente: Sánchez (2018)

4.5.2 Comportamiento de las curvas velocidad y presión del campo de flujo en función de la apertura del obturador de la válvula.

A continuación, se presentan las figuras donde se muestran curvas de presión y velocidad a lo largo de la línea de corriente que ocupa todo el lugar geométrico del eje de simetría de la tubería, desde el plano de entrada del dominio hasta la salida.

4.5.2.1 Comportamiento de velocidad para una apertura de 15°.

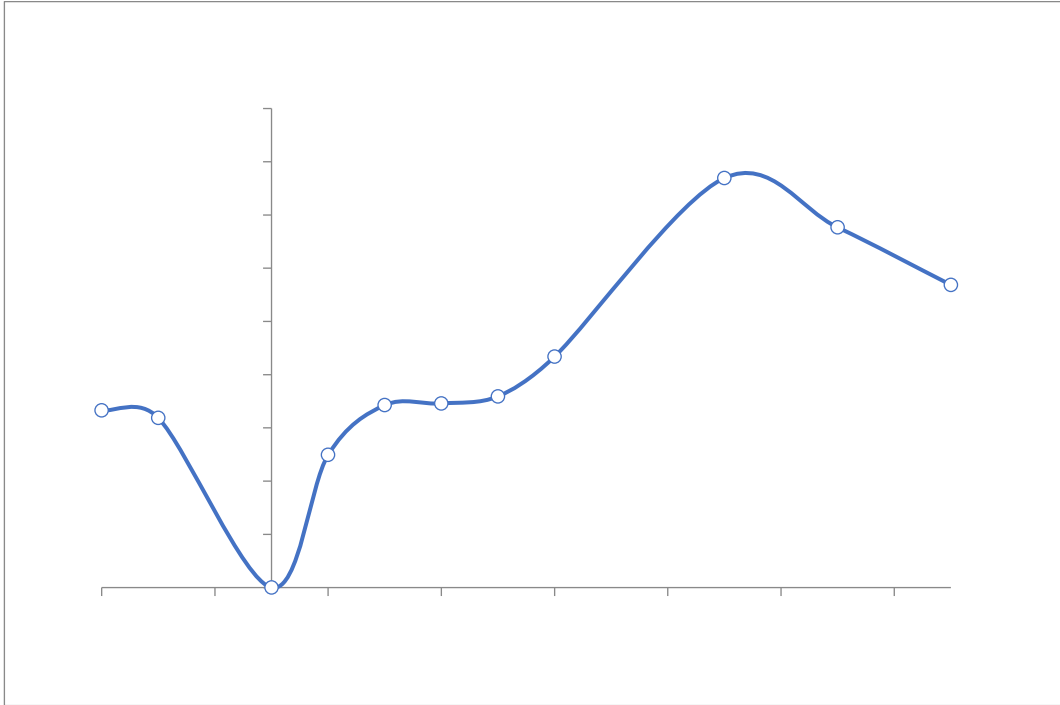


Figura 35: Comportamiento de la velocidad a 15°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 35 se muestra la curva de la velocidad local del flujo a lo largo de su trayectoria, para a un ángulo de 15° de apertura de válvula, para la trayectoria se observa como la velocidad tiende a disminuir al entrar a la región de estrangulación y como aumenta abruptamente de magnitud al pasar a través, y luego cae la velocidad y tiende a estabilizarse en la tubería.

4.5.2.2 Comportamiento de presión para una apertura de 15°.

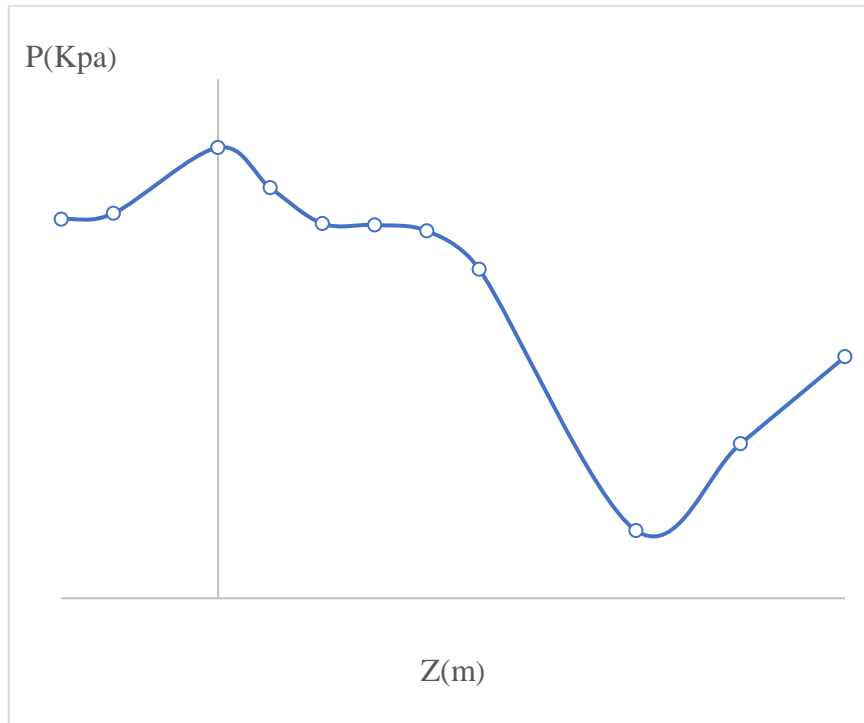


Figura 36: Comportamiento de la presión a 15°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 36, se puede observar como la presión tiende a aumentar al entrar al obturador y cae al pasar a través, a una presión no menor a la de vapor y luego tiende a estabilizarse a una presión mayor a la alcanzada durante la caída de presión.

4.5.2.3 Comportamiento de velocidad para una apertura de 30°.

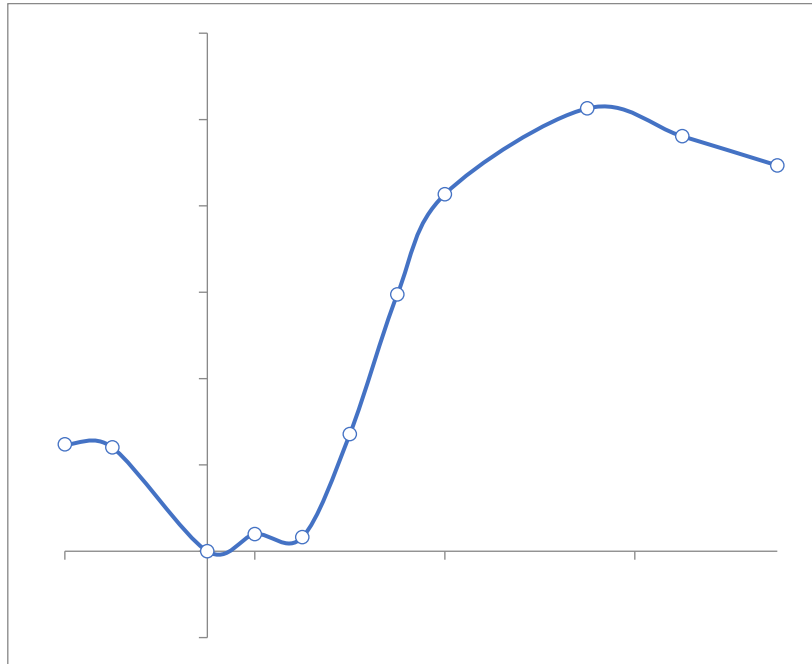


Figura 37: Comportamiento de la velocidad a 30°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la figura 37 se muestra la curva de la velocidad del flujo a lo largo de su trayectoria, a un ángulo de apertura de válvula de 30°, se observa un comportamiento distinto al mostrado en la Figura 35, esto se debe a que a la velocidad a la salida de la tubería es mayor debido que el fluido está en dos fases, donde el vapor a las mismas condiciones de presión y temperatura que el agua líquida adquiere mayor velocidad, por ser menos denso.

4.5.2.4 Comportamiento de presión para una apertura de 30°

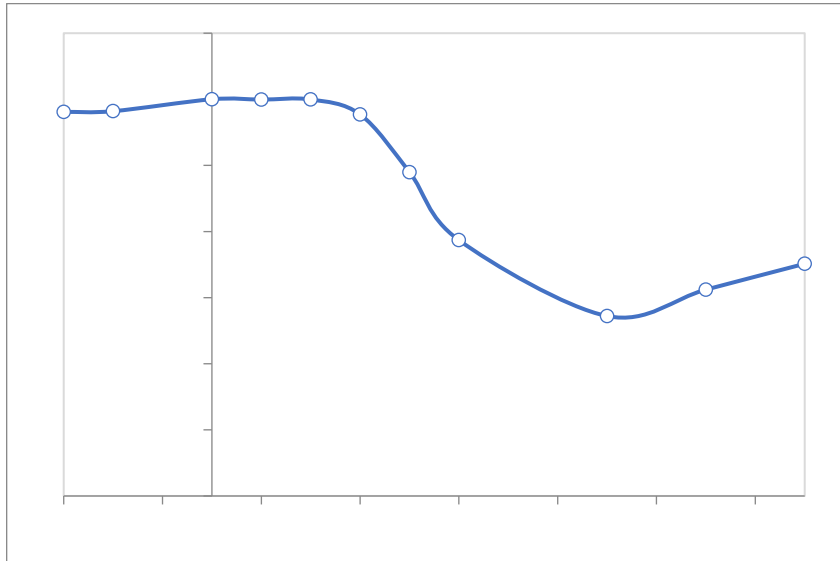


Figura 38: Comportamiento de la presión a 30°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 38, se muestra la curva del perfil de presión a lo largo de una trayectoria de flujo a 30° apertura de la válvula, se observa un comportamiento similar mostrado por la figura 36, solo que la presión al pasar a través del obturador cae bruscamente y luego se estabiliza gradualmente hasta alcanzar la presión de salida.

4.5.2.5 Comportamiento de velocidad para una apertura de 45°.

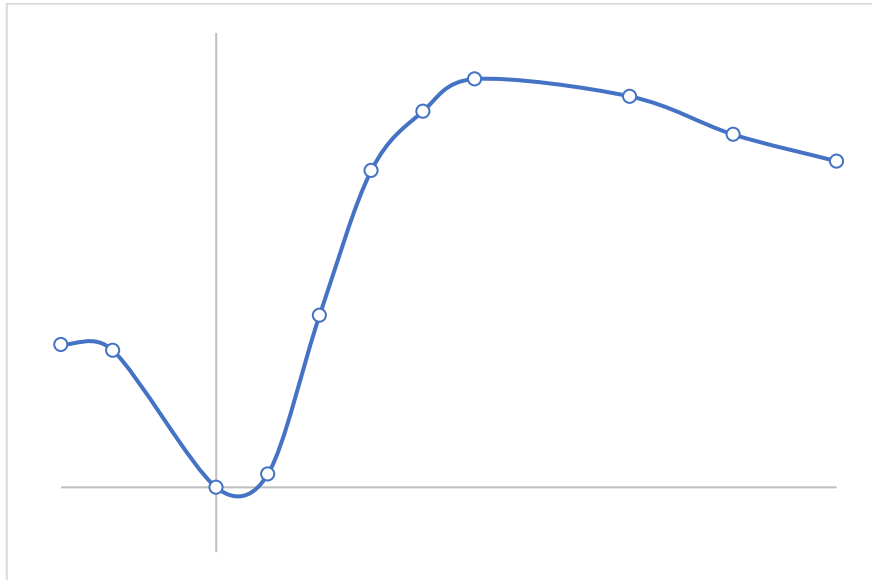


Figura 39: Comportamiento de la velocidad a 45°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 39, estudiamos el comportamiento de velocidad para una apertura de 45°, donde observamos un comportamiento similar a la Figura 37, esto se debe a que la velocidad de salida es mayor que la velocidad de entrada generando vapor de agua líquida dentro de la trayectoria del fluido.

4.5.2.6 Comportamiento de presión para una apertura de 45°.

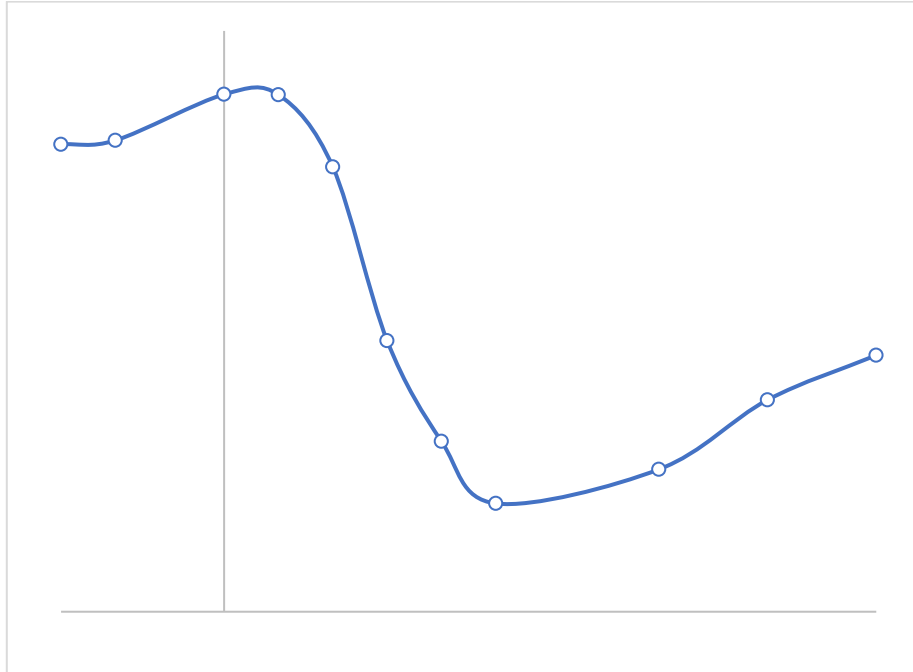


Figura 40: Comportamiento de la presión a 45°.

Fuente: Sánchez (2018)

Así mismo la Figura 40, observamos el comportamiento de la presión para una apertura de 45°, donde se observa que la presión cae bruscamente luego de pasar el obturador de la válvula y luego trata de estabilizar hasta llegar a su presión de salida.

4.5.2.7 Comportamiento de velocidad para una apertura de 60°.

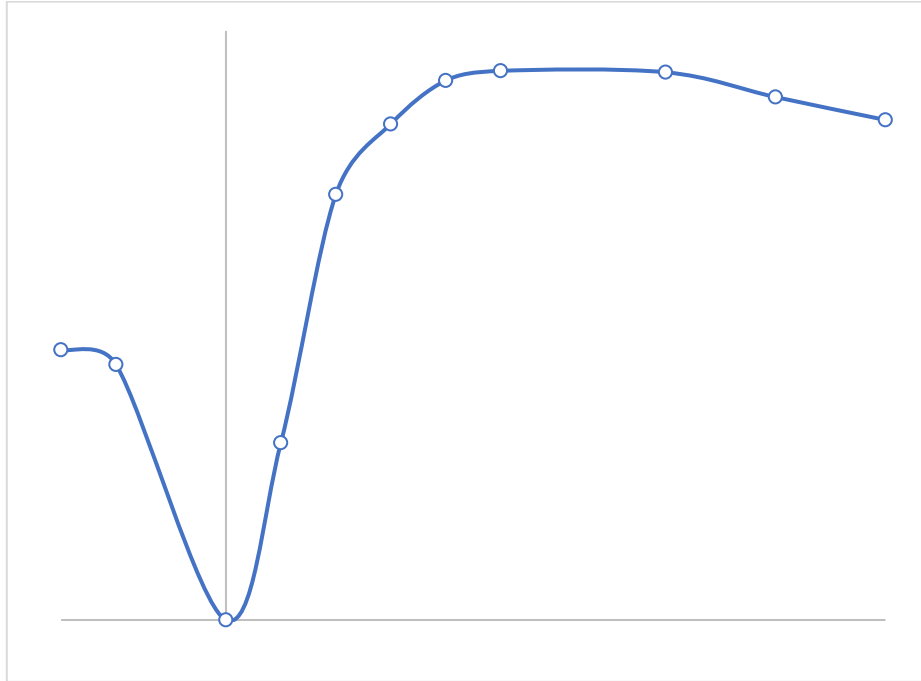


Figura 41: Comportamiento de la velocidad a 60°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 41, el comportamiento de la velocidad en la apertura de 60°, observamos como la velocidad de entrada cae bruscamente justo en el punto donde pasa por el obturador, luego se recupera a la salida del mismo rápidamente hasta estabilizarse.

4.5.2.8 Comportamiento de presión para una apertura de 60°.

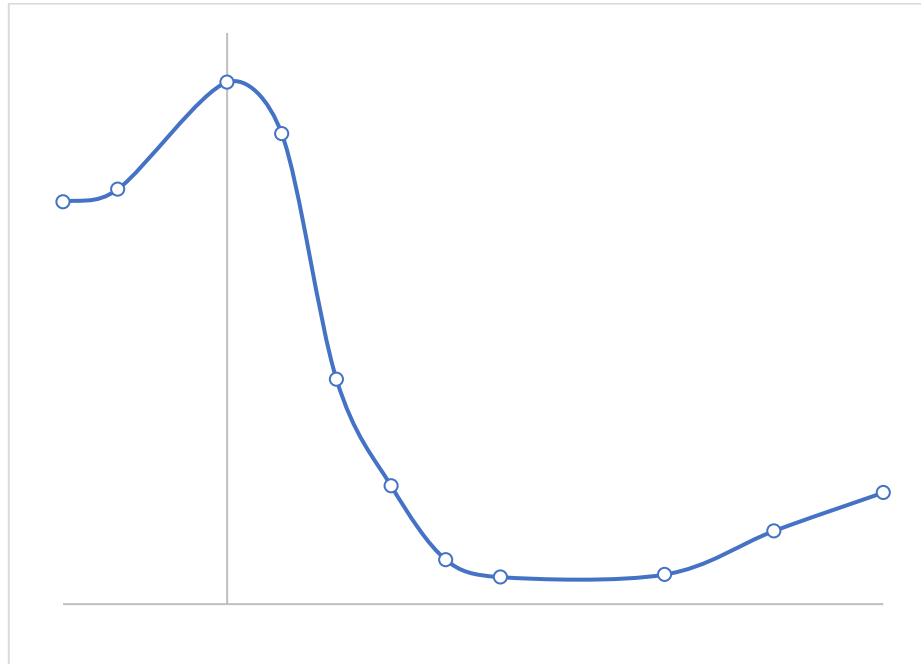


Figura 42: Comportamiento de la presión a 60°.

Fuente: Sánchez (2018)

En la Figura 42, vemos como resultado que la presión a la entrada para una apertura de 60°, tiende a tener una curva parecida a la tangente donde llega a su presión máxima, y luego cae a temperatura ambiente hasta poder recuperarse a una presión no menor a la de vapor.

4.6 Análisis de resultados.

En esta sección se presentan de forma concisa las observaciones más relevantes del análisis dinámico del flujo a través de la válvula de compuerta tipo mariposa por cada tópico de interés evaluado.

4.6.1. Generación del dominio.

Los valores de la verificación de la geometría son iguales, se puede deducir a partir de estos resultados que para el mallado el cambio del ángulo de inclinación del obturador no influye en los parámetros verificados.

Los resultados obtenidos son aceptables, todos los parámetros cumplen con los rangos recomendados, o se acercan a tales parámetros.

4.6.2. Selección del modelo de turbulencia.

En forma general los valores de convergencia obtenidos en las curvas correspondientes al modelo de transporte del esfuerzo de corte (SST por sus siglas en inglés), el cual añade formulaciones robustas y precisas en la modelación de flujos cerca de paredes con independencia de zonas de flujo libre con lo cual, logra mejorar su respuesta en presencia de gradientes de presión adversos, superficies de sustentación y separación de flujos, demuestra que es el modelo de turbulencia apropiado, observándose en la figura 18, que se alcanzan valores RMS de los residuos por debajo de 1×10^{-4} a partir de la iteración 45.

4.6.3. Convergencia de la simulación numérica.

Para aquellos estados simulados en presencia de cavitación, los valores residuales son convergentes para el criterio seleccionado y se observa que el procesador de ecuaciones toma en cuenta como criterio de convergencia los valores de RMS correspondientes, a las ecuaciones de fracción de volumen.

4.6.4. Resultados del post-procesamiento.

Los valores de los coeficientes de descarga y flujo (C_d, C_v) obtenidos en las simulaciones realizadas, tienden a ser constantes en condiciones donde no hay presencia de cavitación, esto se debe a que el flujo es proporcional a la caída de presión a través de la válvula cuando el fenómeno no se produce. También se observa que en presencia de cavitación estos valores disminuyen con respecto al valor obtenido en la simulación sin cavitación.

CONCLUSIONES

Los parámetros que definen la cavitación en una válvula mariposa, son las presiones de los flujos desarrollados; P_1 (antes del obturador), P_2 (después del obturador), temperatura del lecho fluidizado 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.

Las ecuaciones de Rayleigh – Plesset proporcionan la base para el tipo de ecuación que controla la generación de vapor y condensación. No sólo establece la ecuación que describe el aumento de las burbujas de vapor en un fluido líquido; sino también representa un modelo que relaciona la transferencia de masa por unidad de volumen entre dos fases.

La herramienta computacional ANSYS Workbench CFX , es un software robusto, que incluye los modelos matemáticos más avanzados, entre éstos los utilizados en esta investigación para predecir el comportamiento del volumen de vapor, Rayleigh – Plesset y el modelo de turbulencia Shear Stress Transport. (SST).

Al realizar simulaciones numéricas de flujos en condiciones de cavitación en válvula mariposa utilizando la técnica de aproximación numérica CFD, se obtienen resultados que se aproximan a los obtenidos de manera experimental.

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.

Para cada ángulo de apertura hay un caudal máximo, que depende únicamente de la presión P_1 de referencia fijada a la entrada de la válvula, por ello el fenómeno de la cavitación en una válvula mariposa puede ser tratado como un proceso en régimen isotérmico.

RECOMENDACIONES

Aplicar la técnica de aproximación numérica CFD para el estudio de la cavitación en válvulas de asiento cónico y válvula de bola, y comparar con los valores experimentales que se dispongan.

Realizar simulación de la válvula de mariposa con distintos diámetros de tubería en donde se pueda ver el efecto del escalamiento sobre la generación y propagación de la fracción de volumen de vapor.

Realizar la simulación trabajando con las teorías de malla deformable y evaluar el impacto de la cavitación sobre la superficie de la válvula utilizando el módulo de interacción fluido – sólido (FSI por sus siglas en inglés) de ANSYS Workbench.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS-Workbench. Release 18.2 Best Practice Guidelines BPGs. (2018).
- Benítez R., Luna E. (2009) “Análisis de la cavitación en válvulas utilizando técnicas de aproximación numérica”. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Carabobo.
- Caiza L. Quishpe J. (2018) “Análisis numérico de la turbulencia de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa y su impacto social”. Grupo de Investigación en Energías Renovables e Implementación Mecánica de Pymes (GIERIMP) de la Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador.
- Cengel, Y. (2007), Fundamentos de Mecánica de Fluidos. (2ª ed.). Mexico D.F: McGraw Hill Education
- Mataix, C. (1998) Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. (2ª ed.). Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.
- Sampieri R., Fernandez C., Baptista P., (2006) “Metodología de la Investigación”. McGraw – Hill
- Tamayo y Tamayo, Mario. El Proceso de la Investigación científica. Editorial Limusa S.A. México.1997.
- Universidad José Antonio Páez. (2007). Normas para Elaboración y Presentación de los Anteproyectos, Proyectos y Trabajos de Grado. San Diego, Carabobo, Venezuela.
- Vélez, S. Carlos M (2001) Apuntes de metodología de la investigación. Departamento de ciencias básicas Universidad EAFIT, Medellín – Antioquia.Disponible en:<https://es.slideshare.net/saratogawild/apuntes-metodologia-investigación>.
- Villarroel, Q. Luis F. (2015) “Simulación numérica de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa de doble excentricidad”. Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias con mención en Energía. Pontifica Universidad Católica del Perú.

APÉNDICE I

Se presentan los resultados que por su poca relevancia no fueron añadidos a los resultados del capítulo 4, se presentan valores estadísticos de las simulaciones donde comienza la formación de las burbujas de vapor en la cavitación en válvulas de mariposa sometidas a diferentes estados de presión y con diferente ángulo de apertura.

Tabla 10: Valores residuales RMS a 15°

convergencia		U-Mom	V-Mom	W-Mom	P-Vol
P2 [Pa]	Sigma	RMS	RMS	RMS	RMS
468000	5,781606667	3.2E-05	2.2E-05	9.6E-05	1.6E-06
312717	2,138402466	2.4E-05	2.3E-05	9.9E-05	2.7E-04
158000	1,334216923	2.2E-04	2.4E-04	7.9E-04	9.2E-05
3166	0,963125494	8.7E-05	4.6E-05	2.5E-04	3.2E-06

Tabla 11: Valores residuales RMS a 45°

convergencia		U-Mom	V-Mom	W-Mom	P-Vol
P2 [Pa]	Sigma	RMS	RMS	RMS	RMS
468000	5,781606667	7.0E-04	1.9E-03	4.2E-03	1.2E-04
312717	2,138402466	1.0E-03	3.1E-03	4.7E-03	4.4E-04
158000	1,334216923	5.4E-03	8.5E-03	2.1E-02	2.9E-04
3166	0,963125494	5.7E-03	8.6E-03	2.8E-02	3.8E-04

Tabla 12: Valores residuales RMS a 60°

convergencia		U-Mom	V-Mom	W-Mom	P-Vol
P2 [Pa]	Sigma	RMS	RMS	RMS	RMS
468000	5,781606667	3.5E-05	4.2E-05	9.4E-05	5.2E-06
312717	2,138402466	3.8E-05	4.6E-05	9.5E-05	7.4E-06
158000	1,334216923	1.1E-04	1.8E-04	3.5E-04	1.3E-05
3166	0,963125494	1.5E-04	3.1E-04	2.9E-04	7.1E-06

Tabla 13: Tabla de resultados post-procesamiento para la malla de 15°

Sigma	V1[ms-1]	C_v	$C_v d^{-2}$	C_d
5,781606667	1.034	0,0004687	0.021	0.075
2,138402466	1.602	0,000134	0.00596	0.071
1,334216923	1.872	0,0000533	0.00237	0.066
0,963125494	1.969	0,0000245	0.00108	0.059

Tabla 14: Tabla de resultados post-procesamiento para la malla de 45°

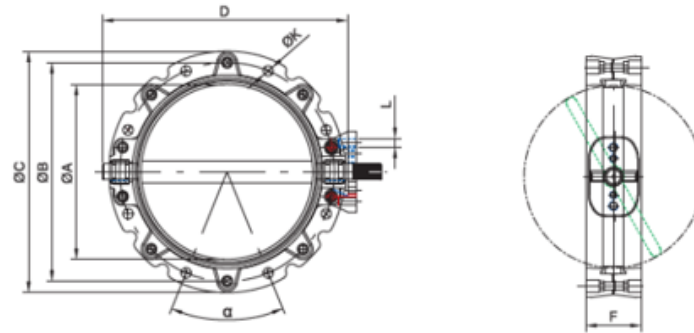
Sigma	V1[ms-1]	C_v	$C_v d^{-2}$	C_d
5,781606667	4.652	0,0004687	0.021	0.420
2,138402466	1.352	0,000134	0.00596	0.046
1,334216923	1.329	0,0000533	0.00237	0.041
0,963125494	1.223	0,0000245	0.00108	0.039

Tabla 15: Tabla de resultados post-procesamiento para la malla de 60°

Sigma	V1[ms-1]	C_v	$C_v d^{-2}$	C_d
5,781606667	8.077	0,0004687	0.021	0.509
2,138402466	1.25	0,000134	0.00596	0.056
1,334216923	1.299	0,0000533	0.00237	0.046
0,963125494	1.300	0,0000245	0.00108	0.039

ANEXO I

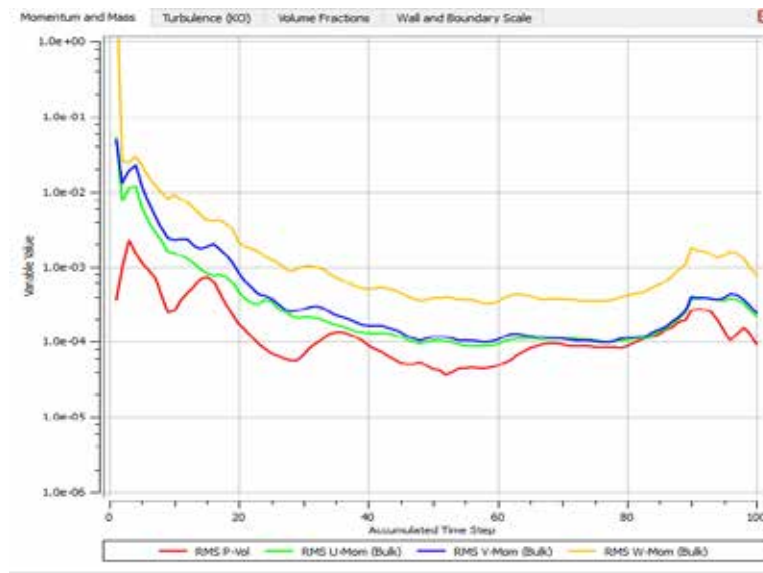
Características de la válvula mariposa del catálogo Ozbekoglu.



Tip Type	ϕA mm	ϕB mm	ϕC mm	ϕD mm	F mm	ϕK mm	L	α	Z
BV2F150	150	200	225	250	77	14	M12	90°	4

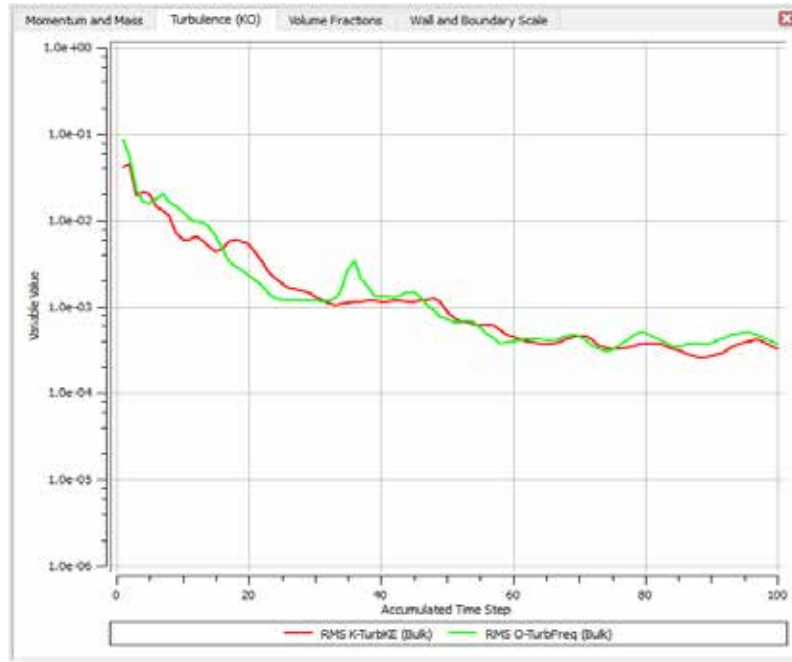
Fuete: Ozbekoglu (2018)

Representación gráfica de convergencia Masa y Momento para una apertura de 15°



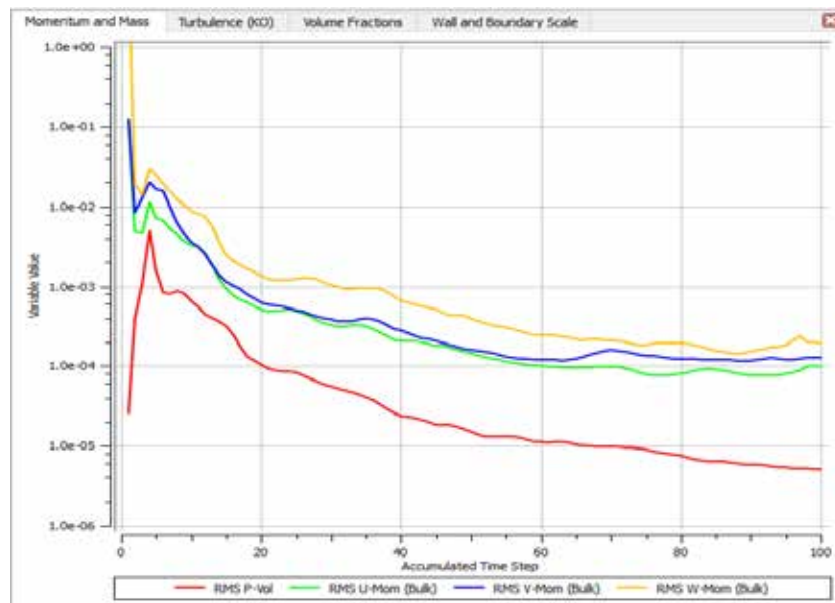
Fuete: Sánchez (2018)

Representación grafica del modelo de turbulencia para una apertura de 15°.



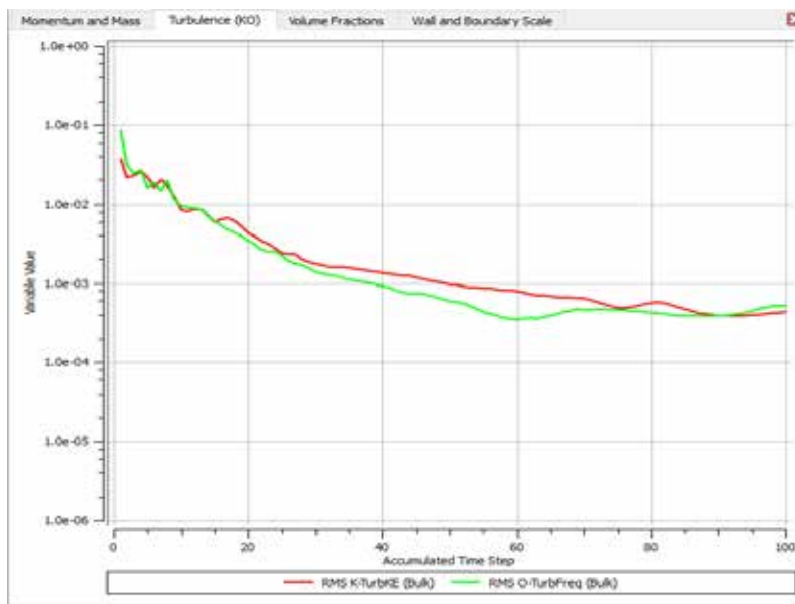
Fuente: Sánchez (2018)

Representación gráfica de convergencia Masa y Momento para una apertura de 45°.



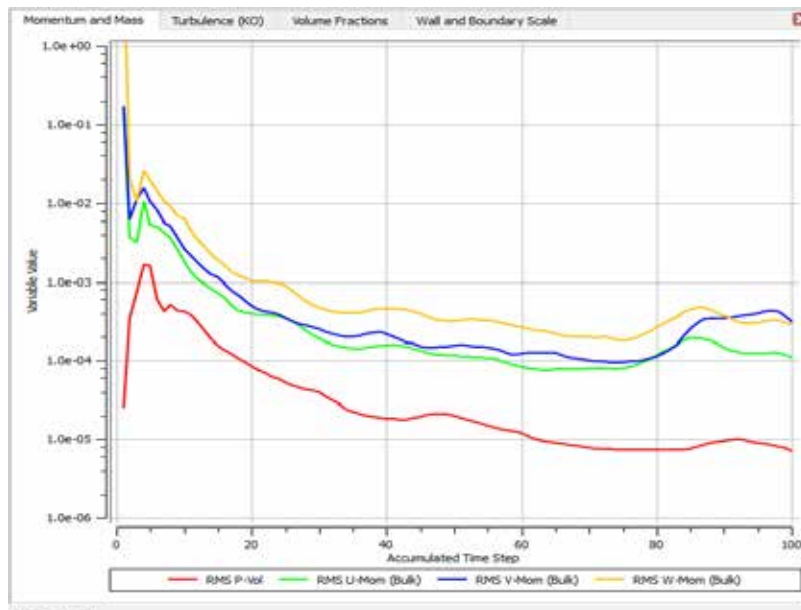
Fuente: Sánchez (2018)

Representación gráfica del modelo de turbulencia para una apertura de 45°



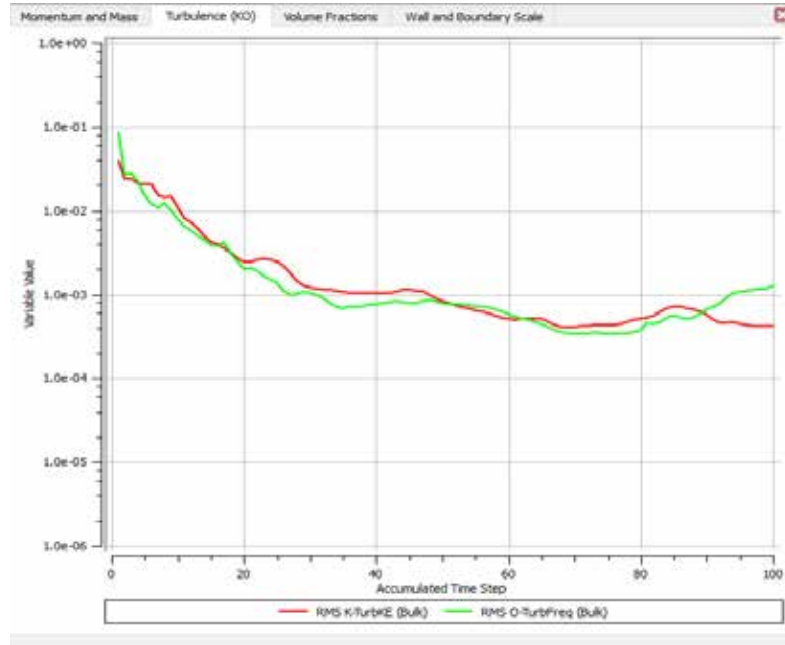
Fuente: Sánchez (2018)

Representación gráfica de convergencia Masa y Momento para una apertura de 60°.



Fuente: Sánchez (2018)

Representación gráfica del modelo de turbulencia para una apertura de 60°.



Fuente: Sánchez (2018)