



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO NUMÉRICO DEL FLUJO CAVITATIVO ALREDEDOR DE UN VENTURI Y UN HIDROÁLABE PLANO CONVEXO CON UN OBSTÁCULO SEMICIRCULAR

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

DÍAZ GADVAY ALEX DAVID
alex.diaz02@epn.edu.ec

SUÁREZ AGUIRRE GISELL ALEXANDRA
gisell.suarez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. HIDALGO DÍAZ VÍCTOR HUGO, D.Sc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. VALENCIA TORRES ESTEBAN ALEJANDRO, PhD.
esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, Diciembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Alex David Díaz Gadway y Gisell Alexandra Suárez Aguirre**, bajo mi supervisión.

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz DSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Esteban Alejandro Valencia Torres PhD.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Díaz Gadway Alex David** y **Suárez Aguirre Gisell Alexandra**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Díaz Gadway Alex David

Suárez Aguirre Gisell Alexandra

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre y hermana. Sin su sacrificio, paciencia y amor no lo habría logrado.

Alex Díaz.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios, quien me permitió despertar cada día con vida y salud. Por haber sido mi guía, apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

A mis padres Roberto y María Esther quienes con su amor, confianza y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy una meta más. Gracias por inculcar en mí tantos valores y principios que me han permitido crecer como persona y como profesional.

A mis hermanos Jefferson y Marlon, por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento. Gracias a toda mi familia y de manera especial a mi abuelita Zoilita que hoy es mi ángel, porque con sus oraciones y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona.

Gisell Suárez.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida. Gracias por darme razones para vivir, motivos para seguir adelante y bendiciones para seguir creyendo en ti.

Agradezco a mi familia por la confianza que depositaron en mí durante el transcurso de mi carrera, no hay palabras que exprese mi gratitud ante ustedes. A pesar de que el destino me lleve a lugares muy distantes, nunca me olvidaré de mi familia y haré hasta lo imposible por garantizar su bienestar porque a ellos no solamente les debo la vida, también todo lo que soy.

De igual manera quiero agradecer a mi director de tesis Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc. por todo el apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

Por último, agradezco a mis amigos. Tenerlos es un privilegio, me han demostrado en todo momento cuanto valoran nuestra amistad. Muchísimas gracias de corazón.

Alex Díaz.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi familia por ser mi motivación para siempre seguir adelante. A mis padres Roberto y María Esther por toda la confianza y apoyo incondicional que me ha ayudado a cumplir este sueño tan anhelado.

De igual manera agradecer a mi director de tesis de grado, DS.c. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, por todo su apoyo y enseñanza brindada durante la realización de este trabajo de titulación.

Por último, quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros que han formado parte de mi vida profesional. Quienes además de brindarme su amistad, consejos y apoyo, han contribuido con la realización de este trabajo.

Gisell Suárez.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	18
Pregunta de Investigación.....	19
Objetivo general.....	19
Objetivos específicos.....	19
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1. Realidad Energética del Ecuador.....	20
1.2. Cavitación en maquinaria hidráulica.....	21
1.2.1. Definición del fenómeno de cavitación.....	21
1.2.2. Principales tipos de cavitación en turbinas hidráulicas.....	21
1.3. Efectos indeseables de la cavitación sobre los sistemas y componentes hidráulicos.....	24
1.4. Estudio numérico del fenómeno de cavitación.....	24
1.4.1. Ecuación de continuidad.....	25
1.4.2. Ecuación de conservación de momento (Ecuación de Cauchy).....	25
1.4.3. Ecuaciones de Navier Stokes.....	25
1.5. Números adimensionales.....	26
1.6. Simulación numérica mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).....	27

1.7.	Discretización del espacio	27
1.8.	Modelos de turbulencia	28
1.8.1.	Modelos k-épsilon y k-omega	29
1.8.2.	Modelo k- ω - SST	29
1.8.3.	Modelo de simulación adaptada a escala (SAS).....	30
1.9.	Modelos de cavitación	30
1.9.1.	Modelo Zwart Gerber Belamri (ZGB).....	30
1.10.	Algoritmo	30
1.11.	Solucionador	31
1.12.	Revisión bibliográfica.....	31
2.	METODOLOGÍA.....	36
2.1.	Estrategia metodológica	36
2.2.	Modelo Geométrico	36
2.2.1.	Modelo geométrico tubo Venturi.....	37
2.2.2.	Modelo geométrico de un Hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular (HFC) 38	
2.3.	Dominio Computacional	38
2.3.1.	Caso Venturi.....	38
2.3.2.	Caso HFC	39
2.4.	Generación de Malla	40
2.4.1.	Mallado bidimensional (2D) tubo Venturi	41
2.4.2.	Mallado tridimensional (3D) HFC.....	43
2.5.	Simulación con <i>OpenFOAM</i>	46
2.6.	Criterios para la calidad de malla.....	46
2.7.	Condiciones de borde.....	47
2.7.1.	Condiciones de borde Venturi	48
2.7.2.	Condiciones de borde HFC	49
2.8.	Variables del modelo de cavitación ZGB	51
2.9.	Estructura del caso de estudio	52

2.9.1. Directorio <i>0.orig</i>	52
2.9.2. Directorio <i>constant</i>	53
2.9.3. Directorio <i>system</i>	53
2.10. Postproceso y comparación de resultados	55
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
3.1. Simulación para el tubo Venturi.....	56
3.1.1. Independencia de malla	56
3.1.2. Residuales	58
3.1.3. Parámetros del caso de estudio	59
3.1.4. Comparación gráfica con estudios previos	59
3.1.5. Análisis de presiones absolutas.....	60
3.1.6. Formación de chorro de reingreso.....	64
3.2. Simulación para el HFC.....	65
3.2.1. Independencia de malla	66
3.2.2. Calidad de malla.....	66
3.2.3. Residuales	67
3.2.4. Números adimensionales	68
3.2.5. Comparación gráfica con estudios previos	69
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	75
4.1. Conclusiones.....	75
4.2. Trabajos futuros	76
Referencias Bibliográficas	77
ANEXOS.....	82
ANEXO I. Producción total de energía en Ecuador.....	83
ANEXO II. Conversión de características en CFD	83
ANEXO III. Términos y constantes de los modelos de turbulencia RANS	84
ANEXO IV. Modelos de cavitación.....	84
ANEXO V. Código <i>Gmsh</i> para mallado bidimensional del tubo Venturi.....	86
ANEXO VI. Descripción de condiciones de borde.....	90

ANEXO VII. Cálculo de variables de entrada para Venturi.....	92
ANEXO VIII. Cálculo de variables del modelo de turbulencia k- ω SST SAS para Venturi 101	
ANEXO IX. Cálculo de variables del modelo de turbulencia k- ω SST SAS para el HFC 103	
ANEXO X. Estructura del caso de estudio en <i>OpenFOAM</i>	105
ANEXO XI. Gráficas de residuales caso Venturi.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Producción de Energía e Importaciones SIN, Ecuador 2019.....	20
Figura 1. 2. Colapso de la burbuja e interacción con él material.	21
Figura 1. 3. Cavitación en alabes de una turbina.	24
Figura 1. 4. Mallas tipo O generadas en Gmsh, a) estructurada y b) no estructurada.	28
Figura 2. 1. Esquema de la metodología de estudio numérico del flujo cavitativo alrededor de un tubo Venturi y un hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular.	36
Figura 2. 2. Esquema metodológico para la obtención del modelo geométrico.....	37
Figura 2. 3. Medidas geometría tubo Venturi [mm].	37
Figura 2. 4. Medidas geometría HFC [mm].	38
Figura 2. 5. Dominio del tubo Venturi en función de la longitud de cuerda [m].	38
Figura 2. 6. Descripción del dominio computacional del tubo Venturi.....	39
Figura 2. 7. Descripción del dominio computacional del HFC [m].....	40
Figura 2. 8. Esquema para generación de malla.....	40
Figura 2. 9. Metodología para obtención de malla 2D Venturi.....	41
Figura 2. 10. Puntos y secciones del dominio Venturi.....	42
Figura 2. 11. División de líneas de cada sección del dominio Venturi.	42
Figura 2. 12. Malla 2D Venturi obtenida en Gmsh.....	42
Figura 2. 13. Metodología para obtención de malla 3D para el HFC.....	43
Figura 2. 14. Detalles del mallado 3D del HFC con el uso de <i>blockMesh</i> rotado a 3°.	44
Figura 2. 15. Mallado 3D del HFC con el uso de <i>blockMesh</i> y <i>SnappyHexMesh</i>	45
Figura 2.16. Desarrollo del software para el estudio de cavitación.....	46
Figura 2. 17. Estructura del caso de estudio.	52
Figura 2. 18. Esquema del procesamiento de resultados.....	55
Figura 3.1. Puntos fijados en la geometría para toma de datos U y P.....	56
Figura 3. 2. Residuales de la malla “M2”.....	58
Figura 3. 3.Comparación gráfica de un ciclo de cavitación, a) resultados simulación numérica, b) observación experimental y c) simulación realizada por Dular et al.....	60
Figura 3. 4. Ubicación de puntos “A” y “B”.	61
Figura 3. 5. Presión absoluta en el punto “A”.	61
Figura 3. 6. Campo de presión de acuerdo con el desarrollo de la nube cavitativa de acuerdo con los instantes marcados en el punto “A”.....	62
Figura 3. 7. Presión absoluta en el punto “B”.	63
Figura 3. 8. Campo de presión de acuerdo con el desarrollo de la nube cavitativa en el punto B.	63

Figura 3. 9. Chorro de reingreso durante el desprendimiento de la nube.....	64
Figura 3. 10. Chorro de reingreso deformando la nube de cavitación.	65
Figura 3. 11. Análisis de distorsión hexaédrica, a) resultados “malla 1” y b) resultados “malla 2”	66
Figura 3. 12. Grafica de residuales en función del número de iteraciones, a) residuales caso “A” y b) residuales caso “B”.	67
Figura 3. 13. Gráficas del coeficiente de presión en función del tiempo adimensional de los casos “A” y “B”.	68
Figura 3. 14. Imágenes para ubicar el punto de partida del estudio, a) cavidad separada en forma de brazos, b) pruebas experimentales del HFC (daños en la superficie, orejas de conejo) y c) nubes de cavitación sobre el HFC obtenidas experimentalmente.	69
Figura 3. 15. Gráfica de volumen total de vapor, a) gráfica del caso “A” y b) gráfica del caso “B”.	70
Figura 3. 16. Comparación del ciclo evolutivo de la cavidad separada, a) imágenes de estudios previos, b) resultados del caso “A” y c) resultados del caso “B”.	71
Figura 3. 17. Vorticidad según Q criterio de la cavidad separada, a) imágenes de estudios previos, b) resultados del caso “A” y c) resultados del caso “B”.	72
Figura 3. 18. Gráfica de volumen total de vapor para el caso “A” y “B”.	73
Figura 3. 19. Evolución de la cavidad adjunta, a) resultados caso “A” y b) resultados caso “B”	74
Figura 3. 20. Vorticidad de la cavidad adjunta, a) resultados caso “A” y b) resultados caso “B”	74
Figura A 1. Conversión de características entre CAD, CAE y CDF.	84
Figura A 2. Ubicación de puntos en todo el dominio.	92
Figura A 3. Ubicación de puntos en zona de estudio.	92
Figura A 4. Secciones del a) inlet, b) garganta y c) outlet del tubo Venturi.....	93
Figura A 5. Rugosidad relativa para distintos materiales.....	94
Figura A 6. Ubicación de valores en diagrama de Moody.	95
Figura A 7. Ubicación coeficiente de pérdida para contracción.	96
Figura A 8. Ubicación coeficiente de pérdida para contracción.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Principales tipos de cavitación en turbinas hidráulicas.	22
Tabla 1. 2. Principales tipos de cavitación en turbinas hidráulicas.	23
Tabla 1. 3. Descripción de números adimensionales.	26
Tabla 1. 4. Descripción de números adimensionales.	27
Tabla 1. 5. Algoritmos Numéricos.	31
Tabla 2. 1. Resolución personalizada para HFC usado en la “malla 1”.	44
Tabla 2. 2. Resolución personalizada para HFC usado en la “malla 2”.	45
Tabla 2. 3. Datos experimentales obtenidos para el tubo Venturi.	47
Tabla 2. 4. Datos experimentales obtenidos para el tubo Venturi.	48
Tabla 2.5. Condiciones de borde para el dominio computacional caso Venturi.	48
Tabla 2. 6. Condiciones iniciales para el caso Venturi.	49
Tabla 2. 7. Condiciones de borde para cada variable del caso.	49
Tabla 2. 8. Condiciones de borde para cada variable del caso.	49
Tabla 2. 9. Datos experimentales obtenidos para el HFC.	50
Tabla 2. 10. Condiciones de borde para el dominio computacional del HFC.	50
Tabla 2. 11. Condiciones iniciales para el caso HFC.	50
Tabla 2. 12. Condiciones de borde para cada variable del caso.	51
Tabla 2. 13. Condiciones de borde para cada variable del caso.	51
Tabla 2. 14. Coeficientes para el modelo ZGB en cada caso de estudio.	51
Tabla 2. 15. Descripción del archivo initialConditions.	53
Tabla 2. 16. Descripción de los archivos en el directorio system.	54
Tabla 3.1. Independencia de malla velocidad U [m/s].	57
Tabla 3.2. Independencia de malla presión P [Pa].	57
Tabla 3.3. Números adimensionales para malla seleccionada.	59
Tabla 3. 4. Tiempos en los que se identifica la cavidad.	70
Tabla 3. 5. Tiempo y fracción de vapor para el ciclo de cavitación separada.	71
Tabla 3. 6. Tiempo y fracción de vapor para el ciclo de cavitación adjunta.	73
Tabla A. 1. Producción total de Energía e Importaciones del S.N.I. según el Balance Nacional de Energía Eléctrica agosto 2019.	83
Tabla A. 2. Constantes y funciones auxiliares para el modelo SAS.	84
Tabla A. 3. Descripción de condiciones de borde.	90
Tabla A. 4. Cuadro de resumen.	102
Tabla A. 5. Propiedades termo físicas del Agua saturada.	103

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidad
\vec{V}	Vector de velocidad
$\vec{V}\vec{V}$	Tensor de segundo orden
x, y, z	Ejes espaciales
g	Gravedad
σ_{ij}	Tensor de esfuerzo
u	Velocidad
μ	Viscosidad dinámica
i y j	Subíndices de los ejes espaciales
α	Fracción volumétrica de vapor
ρ_v	Densidad para el vapor
ρ_l	Densidad para el líquido
μ_v	Viscosidad dinámica para el vapor
μ_l	Viscosidad dinámica para el líquido
Re	Número de Reynolds
U_∞	Velocidad de flujo libre.
L	Longitud característica
ν	Viscosidad cinemática
σ	Número de cavitación
p_r	Presión medida en un punto de referencia r
p_v	Presión de vapor
V_v	Valor de volumen de vapor
V	Valor del volumen total de la mezcla
C_p	Coficiente de presiones
p_i	Presión en cada instante de tiempo
ξ	Tiempo adimensional
t	Tiempo a determinado instante
t_0	Tiempo inicial
t_f	Tiempo final
k	Energía cinética turbulenta
ϵ	Disipación turbulenta

ω	Disipación específica turbulenta
τ_{ij}	Tensor de estrés de Reynolds
k	Energía cinética turbulenta
I	Intensidad turbulenta
u_{ref}	Velocidad
ω	Tasa de disipación específica de turbulencia
C_μ	Constante de turbulencia
l	Longitud de la cuerda
L_{vK}	Generalización tridimensional de la definición de capa límite Considerando una escala de longitud de von Kármán.
F_v	Constante de calibración para vaporización.
F_C	Constante de calibración para condensación.
r_{nuc}	Fracción de volumen del sitio de nucleación.
R_B	Radio de la burbuja.
p	Presión de referencia.
C_o	Número de Courant
\dot{m}	Tasa de transferencia de masa por unidad de volumen
$\frac{\partial \gamma}{\partial t}$	Término de compresión artificial
$\gamma(1 - \gamma)$	Término de activación para compresión artificial
u_c	Campo de velocidad
y^+	Criterio Y Plus
u_τ	Velocidad de fricción cerca de la pared
y	Distancia más cercana a la pared
Ω	Número Omega
NE	Número total de elementos de la malla.
ND	Número total de nodos de la malla.
μ_t	Viscosidad turbulenta
p_k	Término de producción de turbulencia debido a fuerzas Viscosas
$C_{1c}, C_{2c}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	Constantes empíricas.
C_μ	Coefficiente empírico
μ_m	Viscosidad dinámica de la mezcla
μ_{eff}	Viscosidad efectiva

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó el estudio numérico de flujo cavitativo inestable alrededor de un Venturi y un hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular (HFC). El objetivo es comprender la topología y comportamiento del fenómeno, desde la formación de cavidades hasta su colapso. Con base en dinámica de fluidos computacional (CFD) se desarrolló una metodología para estudiar las distintas etapas del flujo cavitativo. El estudio numérico se llevó a cabo en el entorno de código abierto de OpenFOAM con el uso de las herramientas de mallado Gmsh y SnappyHexMesh. La resolución de las ecuaciones Navier-Stokes se realizó con el algoritmo PIMPLE con aproximación RANS. Además, para estudiar cambio de fase se usó el modelo de turbulencia $k - \omega$ SST SAS y el modelo de cavitación Zwart-Gerber-Belamri (ZGB). Los resultados obtenidos fueron validados con estudios previos mediante la comparación gráfica de datos experimentales y simulaciones numéricas. Los resultados muestran la presencia de dos picos de presión correspondientes al desprendimiento y colapso de la cavidad en el Venturi. Mientras que, para el caso de HFC se logró captar la nube de cavitación en forma de herradura para el caso en 3D, la misma que se considera la mayor causante de daños por erosión.

Palabras clave: cavitación inestable, máquinas hidráulicas, OpenFOAM, SnappyHexMesh.

ABSTRACT

The present work carried out the numerical study of unsteady cavitating flow around a Venturi and a plane-convex hydrofoil with a semicircular obstacle (HFC). The aim of this study is to understand the topology and behavior of the phenomenon, from cavity formation to its collapse. Based on computational fluid dynamics (CFD), a methodology was developed to study the different stages of cavitating flow. The numerical study was conducted in OpenFOAM's open source environment with the use of the Gmsh and SnappyHexMesh meshing tools. The resolution of Navier-Stokes equations was performed with the PIMPLE algorithm with RANS approximation. In addition, the k-omega SST SAS turbulence model and the Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) cavitation model were used to study phase change. The results obtained were validated with previous studies by graphical comparison of experimental data and numerical simulations. The results show the presence of two pressure peaks corresponding to the detachment and collapse of the cavity in the Venturi. While, in the case of HFC, the cavitation cloud was captured in the form of a horseshoe for the 3D case, which is considered the largest cause of erosion damage.

Keywords: unsteady cavitation, hydraulic machines, OpenFOAM, SnappyHexMesh.

ESTUDIO NUMÉRICO DEL FLUJO CAVITATIVO ALREDEDOR DE UN VENTURI Y UN HIDROÁLABE PLANO CONVEXO CON UN OBSTÁCULO SEMICIRCULAR

INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica basada en hidráulica presenta numerosas ventajas para países como Ecuador, donde se dispone de fuentes de agua de alto caudal [1]. El documento denominado “*El sector eléctrico ecuatoriano 2007-2016*”, publicado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), establece que la capacidad instalada de generación eléctrica ha progresado en la última década [2]. Este incremento en la oferta de generación de electricidad fue posible gracias a la inversión en nuevas centrales hidroeléctricas. Las mismas que se incorporaron al Sistema Nacional Interconectado (SNI) permitiendo aumentar la generación de energía hidroeléctrica, reducir la aplicación de centrales térmicas y ampliar la cobertura de electricidad [3].

Aunque las hidroeléctricas representan un camino factible y óptimo para producir electricidad, debido a su alto nivel de desarrollo tecnológico y bajo impacto ambiental, también conllevan retos de diseño [1]. La presencia de cavitación y erosión en elementos como álabes de turbina ocasionan daños materiales y contribuyen a la reducción de la eficiencia de operación. Este problema ha ganado importancia debido a la expansión de fuentes de energía renovables, donde las centrales hidroeléctricas desempeñan un papel importante en la regulación de la red eléctrica [4].

La cavitación es una de las investigaciones clave de la ingeniería hidráulica y la mecánica de fluidos multifase en general [4]. Todos estos aspectos motivan a los investigadores a desarrollar métodos y modelos numéricos para el estudio de la erosión por cavitación y para el diseño de sistemas, utilizando simulaciones con dinámica de fluidos computacional (CFD) [5]. En este escenario, los países como Ecuador, que dependen en gran medida de la energía hidroeléctrica, pueden tener un alto beneficio [1].

En base a lo expuesto, la necesidad de realizar un estudio numérico del fenómeno mencionado con la ayuda de CFD es evidente, se espera comparar los resultados de la simulación numérica con estudios previos.

Pregunta de Investigación

¿Cómo se desarrolla el fenómeno de cavitación alrededor de superficies complejas?

Objetivo general

Estudiar numéricamente el flujo cavitativo alrededor de un Venturi y un hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular.

Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte del fenómeno de cavitación en maquinaria hidráulica.
- Desarrollar un modelo geométrico bidimensional de un Tubo Venturi y un modelo tridimensional de un hidroálabe plano convexo con obstáculo semicircular usando herramientas CAD.
- Generar una malla estructurada bidimensional para el Tubo Venturi y una malla híbrida tridimensional para el hidroálabe plano convexo con obstáculo semicircular.
- Simular el flujo cavitativo inestable en cada caso para estudiar el desarrollo de cavidades de vapor.
- Validar los resultados en base a la comparación gráfica con estudios previos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Realidad Energética del Ecuador

La energía es una de las bases para el desarrollo humano, crea condiciones para que las personas puedan beneficiarse de una serie de oportunidades. El consumo de energía eléctrica es mayor con respecto a los otros tipos de energía y su generación depende del número de habitantes y la demanda existente. En Ecuador la proyección de la población según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), para el año 2018 fue de 17'023.000 habitantes, esperando un incremento del 2% para el año 2019 [6]. La cobertura de la demanda del servicio eléctrico a nivel nacional se ha mantenido sobre el 97%, con pequeños incrementos en los últimos cinco años [7].

Según el Balance Nacional de Energía Eléctrica (BNEE), hasta el mes de agosto del año 2019, la producción total de energía e importaciones del Sistema Nacional Interconectado (SNI) es de 27.382 Gigawatts hora (GWh). De los cuales, el 84,17% fue producido por energía hidráulica, el 13,41% por energía térmica, el 1,44% por energía generada con biomasa y el 0,40% por la interconexión con Perú y Colombia [8]. Los datos descritos se muestran en la Figura 1.1. y se encuentran detallados en el Anexo I.

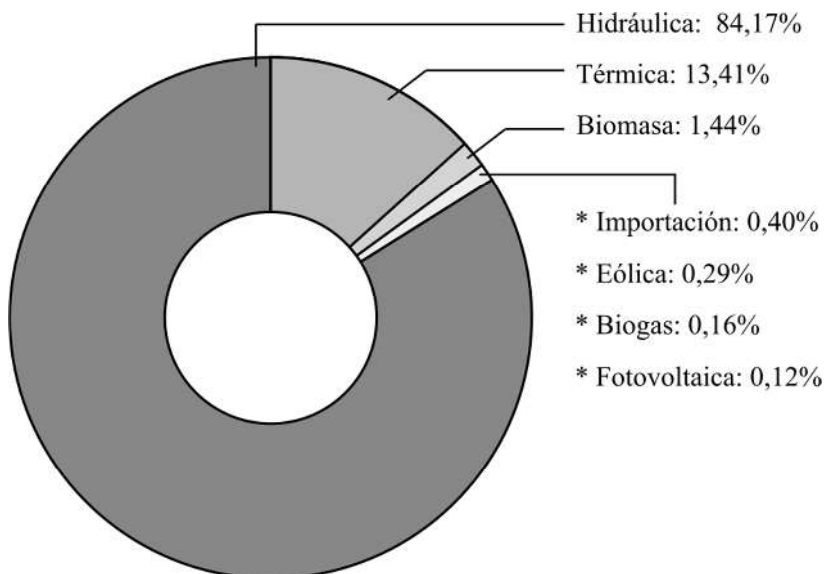


Figura 1. 1. Producción de Energía e Importaciones SIN, Ecuador 2019.
(Fuente: [8])

La potencia efectiva total de la generación de energía eléctrica es de 8.058,11 Megawatts (MW). De los cuales, el 62,59% pertenece a la energía hidráulica con un valor cercano a 5.043,18 MW [8]. Esto representa la capacidad real a la que operan las centrales hidroeléctricas del país.

1.2. Cavitación en maquinaria hidráulica

1.2.1. Definición del fenómeno de cavitación

Se define la cavitación como la condición de un líquido cuando alcanza un estado en el que las cavidades de vapor se forman y crecen, debido a la reducción de presión dinámica a la presión de vapor del líquido a temperatura constante. En un líquido que fluye, estas cavidades están sujetas a un aumento de presión que detiene e invierte su crecimiento, colapsando implosivamente y desapareciendo [9].

El flujo cavitativo es considerado como un flujo multifásico, debido a que las cavidades de vapor tienden a moverse junto con la fase líquida, mediante un medio de baja presión. Sin embargo, las dos fases por las cuales se distingue la cavitación presentan un cambio de interface [10]. La primera fase se caracteriza por la aparición y el crecimiento de las cavidades de vapor en el líquido, las cuales son arrastradas por el movimiento del flujo. Estas cavidades aparecen en la superficie sólida de contacto con el líquido. En la segunda fase se produce el colapso, este colapso se produce por el cambio de presión ya que la presión exterior a la cavidad o burbuja es mayor a la presión de vapor. Al colapsarse violentamente, la condensación se produce de forma instantánea pudiendo ocasionar daños en la superficie sólida [11]. La Figura 1.2 muestra las fases de cavitación antes mencionadas.

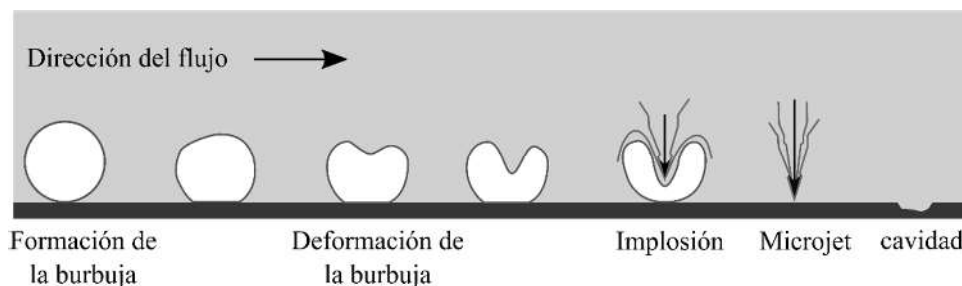


Figura 1. 2. Colapso de la burbuja e interacción con él material.
(Fuente: [12])

1.2.2. Principales tipos de cavitación en turbinas hidráulicas

Según las condiciones de operación de la turbina, la cavitación puede presentarse de diferentes maneras. Los principales tipos de cavitación se producen como cavidades adjuntas, cavitación de borde, burbujas viajeras, de vórtice, vórtice entre palas y vórtice de Von Karman. En las Tablas 1.1 y 1.2 se habla en detalle cada tipo de cavitación antes mencionados.

Tabla 1. 1. Principales tipos de cavitación en turbinas hidráulicas.

Tipo	Esquema
<p data-bbox="421 360 675 392" style="text-align: center;">Cavidades adjuntas</p> <p data-bbox="237 477 858 779">Las burbujas se desarrollan en forma de macro cavidades y se adhieren a una pared sólida que limita el flujo. Este tipo de cavitación es muy común y puede presentar distintos regímenes. Se presenta como cavitación de láminas, con bajo riesgo de erosión y como cavitación de nubes, con alto riesgo [9].</p>	
<p data-bbox="421 880 675 911" style="text-align: center;">Cavitación de borde</p> <p data-bbox="237 1028 858 1285">Este tipo de cavitación se caracteriza por tomar la forma de una cavidad adherida en el lado de succión del corredor de álabes. Al ser inestable, este tipo de cavitación es muy agresiva, con probabilidad de erosionar los álabes a gran medida y provocar altas fluctuaciones en la presión [9].</p>	
<p data-bbox="347 1417 751 1449" style="text-align: center;">Cavitación de burbujas viajeras</p> <p data-bbox="237 1588 858 1890">Se trata de burbujas transitorias que pueden crearse en puntos de baja presión en la extensión de una pared sólida o en un líquido de forma interna, como puede ser en regiones de alta turbulencia o núcleos de vórtices. Es causada por el bajo número de cavitación y su crecimiento está en función de la carga [9].</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 1. 2. Principales tipos de cavitación en turbinas hidráulicas.

Tipo	Esquema
<p data-bbox="411 360 679 392">Cavitación de vórtice</p> <p data-bbox="240 506 850 763">Ocasionada por las cavidades formadas en núcleos centrales, a causa del flujo con vorticidad. Estas pueden aparecer como cavidades fijas o cavidades viajeras, teniendo en común la presencia de un líquido que pasa una sola vez a través de la zona de cavitación [9].</p>	
<p data-bbox="336 916 754 947">Cavitación de vórtice entre palas</p> <p data-bbox="240 1039 850 1346">Está formado por vórtices secundarios, localizados en los canales causados por la separación del flujo entre los álabes. Los vórtices surgen al operar en carga parcial y en rangos de operación de cabeza extremadamente alta. Es inestable debido a su bajo número de cavitación y es causante de fuertes vibraciones [9].</p>	
<p data-bbox="309 1464 783 1496">Cavitación de vórtice de Von Karman</p> <p data-bbox="240 1624 850 1839">Esta cavitación se produce en el espacio entre la punta del álabe y la carcasa de la turbina. Es un tipo fuerte de cavitación que se caracteriza por el desprendimiento periódico de vórtices desde el borde posterior de los álabes [9].</p>	

(Fuente: Propia)

1.3. Efectos indeseables de la cavitación sobre los sistemas y componentes hidráulicos

En maquinaria hidráulica la presencia de cavitación causa múltiples consecuencias no deseadas como son inestabilidades de flujo, daños en la superficie del material, vibraciones excesivas, incremento en el ruido y disminución en el rendimiento de operación de la máquina. Además, la acción repetitiva de la implosión de burbujas formadas por cavitación cerca de una superficie metálica causa estrés cíclico. Produce una acumulación de picaduras en un área estrecha erosionando el material y ocasiona una pérdida de masa en el mismo [9], como se muestra en la Figura 1.3.

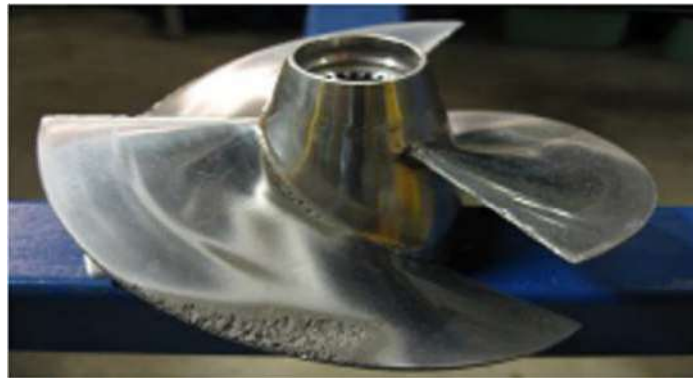


Figura 1. 3. Cavitación en alabes de una turbina.
(Fuente: [13])

Los hoyos de cavitación aumentan la turbulencia del flujo del fluido y crean grietas que actúan como sitios de nucleación para burbujas de cavitación adicionales. Los hoyos también aumentan el área de la superficie de los componentes y dejan atrás las tensiones residuales. Esto hace que la superficie sea más propensa a la corrosión por tensión [13]. Es difícil evitar la presencia de cavitación y más aún en turbinas hidráulicas, pues, no se puede evitar por completo, pero es posible reducirla con ayuda del estudio de la dinámica de fluidos.

1.4. Estudio numérico del fenómeno de cavitación

El movimiento de los fluidos se describe mediante ecuaciones diferenciales, es decir, la conservación de la masa (ecuación de continuidad) y la segunda Ley de Newton (ecuación de Navier-Stokes). Dichas ecuaciones se aplican a cada punto y por lo tanto permiten resolver los detalles del flujo en todas partes del dominio [14]. Estas ecuaciones se pueden combinar con ecuaciones adicionales, cómo es una ecuación de estado y una ecuación de transporte, de acuerdo con el caso de estudio.

1.4.1. Ecuación de continuidad

La ecuación diferencial general, para la conservación de masa o continuidad, está dada por la ecuación 1.1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1.1)$$

Donde ρ es la densidad, t el tiempo y \vec{V} el vector de velocidad. Esta ecuación es válida para el estudio de flujo compresible en cualquier punto del dominio. Si se descompone el operador de divergencia, se tiene la ecuación en coordenadas cartesianas mostrada en la ecuación 1.2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

Para la cavitación inestable en flujo turbulento, se considera la ecuación de continuidad de la siguiente manera,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1.3)$$

1.4.2. Ecuación de conservación de momento (Ecuación de Cauchy)

La ecuación diferencial general para la conservación de cantidad de movimiento lineal es conocida como ecuación de Cauchy, ecuación 1.4.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (1.4)$$

Donde $\vec{V} \vec{V}$ es un tensor de segundo orden (producto exterior de \vec{V}), g es la gravedad y σ_{ij} es un tensor de esfuerzo. Esta ecuación es válida para flujo compresible, así como para incompresible, y es válida en cualquier punto en el dominio de flujo. Además, se puede ver que es una ecuación vectorial, por tanto, representa tres ecuaciones escalares, una por cada eje coordenado en problemas tridimensionales [14].

1.4.3. Ecuaciones de Navier Stokes

Para que la ecuación de continuidad y la ecuación de Cauchy sean matemáticamente solucionables, es necesario escribir el tensor de esfuerzo en términos del campo de velocidad y del campo de presión, mediante ecuaciones constitutivas. Esto da como resultado una nueva expresión llamada ecuación de Navier-Stokes, la cual, es una

ecuación diferencial parcial de segundo orden, no lineal e inestable. La ecuación 1.5 representa la ecuación de Navier-Stokes para flujo incompresible con viscosidad constante, y la ecuación 1.6 para flujo cavitativo en flujo turbulento.

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (1.6)$$

Las propiedades de fluido de mezcla homogénea pueden ser estimadas usando la ecuación 1.7 y la ecuación 1.8 [5].

$$\rho = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l \quad (1.7)$$

$$\mu = \alpha \mu_v + (1 - \alpha) \mu_l \quad (1.8)$$

Donde α es la fracción volumétrica de vapor, v y l son los subíndices para vapor y líquido, respectivamente.

1.5. Números adimensionales

Los números adimensionales son números puros que permiten caracterizar propiedades de sistemas de acuerdo con el significado físico que representa. Estos números permiten el diseño de modelos físicos y ayudan con el reporte de resultados experimentales. Permiten predecir tendencias en cuanto al comportamiento del flujo. Se establece el tipo de número adimensional a utilizar de acuerdo con los criterios y necesidades del investigador. Los números adimensionales utilizados en este trabajo son el número de Reynolds, número de cavitación, fracción volumétrica de vapor, coeficientes de presión y el tiempo adimensional [15].

Tabla 1. 3. Descripción de números adimensionales.

Nombre	Ecuación	Descripción
Número de Reynolds	$Re = \frac{U_\infty L}{\nu}$	Se define como la relación de las fuerzas inerciales con respecto a las fuerzas viscosas [14].
Número de cavitación	$\sigma = \frac{p_r - p_v}{\frac{1}{2} U_\infty^2 \rho}$	El número de cavitación es calculado para definir condiciones de flujo inestable [16].

(Fuente: Propia)

Tabla 1. 4. Descripción de números adimensionales.

Nombre	Ecuación	Descripción
Fracción volumétrica de vapor	$\alpha = \frac{V_v}{V}$	Relación entre el volumen de vapor y el volumen total de la mezcla [5].
Coeficiente de presiones	$C_p = \frac{p_i - p_r}{\frac{1}{2} U_\infty^2 \rho}$	Ayuda a comprender la evolución de los efectos de la cavitación [16].
Tiempo adimensional	$\xi = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}$	Es usado por conveniencias del análisis [11].

(Fuente: Propia)

1.6. Simulación numérica mediante dinámica de fluidos computacional (CFD)

La simulación numérica con CFD utiliza métodos numéricos para el análisis de problemas de fluidos. El espacio de resolución suele ser un dominio fluido discretizado y limitado por condiciones de contorno [17]. Uno de los software más utilizados en una simulación CFD es *OpenFOAM*, el mismo que se detalla en una sección más adelante.

La estructura de un sistema de simulación CFD está conformada por cinco pasos, seleccionar el modelo matemático, discretización del espacio y de ecuaciones, analizar el esquema numérico y sus propiedades de estabilidad, obtener la solución del esquema numérico y post procesamiento gráfico de los datos numéricos [18]. La aplicación de CFD es característica de la ingeniería asistida por computadora (CAE), para mejorar la eficiencia de la simulación, el modelado del diseño asistido por computadora (CAD) debe ser simplificado [19]. La conversión de características entre CAD, CAE y CFD se presentan en el Anexo II.

1.7. Discretización del espacio

De forma general, la estrategia de CFD es reemplazar el dominio del problema continuo con un dominio discreto utilizando una cuadrícula o "malla". En el dominio continuo, las

variables de flujo se definen en cada punto. En el dominio discreto, las variables se definen solo en los puntos de la cuadrícula [20]. Existen mallas estructuradas, no estructuradas e híbridas. La Figura 1.5 muestra un ejemplo de malla estructurada y una no estructurada tipo O, para un perfil aerodinámico. La característica esencial de una estructurada es la uniformidad de las celdas, las líneas de la malla se alinean con las líneas del perfil aerodinámico. Se emplea para controlar directamente la forma y el tamaño de cada elemento, además se usa para reducir el costo computacional. Las mallas no estructuradas constan de celdas de varias formas no uniformes y son empleadas en geometrías complejas para obtener altos refinamientos en zonas de interés. Por último, una malla híbrida combina regiones de mallas estructuradas y no estructuradas y se emplea para permitir la alta resolución cerca de una pared sin necesitar alta resolución lejos de la pared [14].

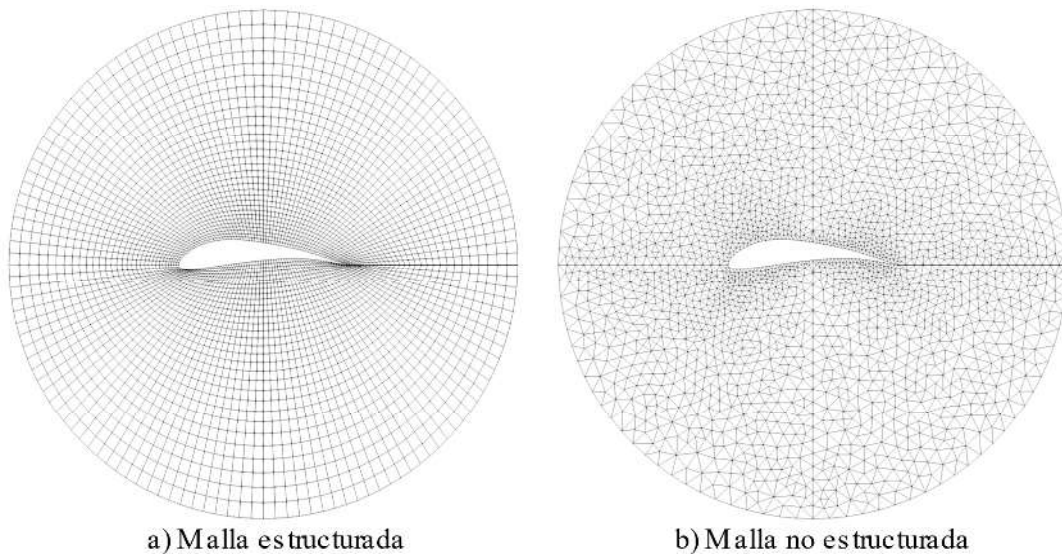


Figura 1. 4. Mallas tipo O generadas en Gmsh, a) estructurada y b) no estructurada.
(Fuente: Propia)

1.8. Modelos de turbulencia

Los modelos de turbulencia aproximan el comportamiento desordenado de las partículas en el flujo de un fluido. Las ecuaciones de gobierno del fenómeno se ven afectadas por un término no lineal convectivo que evita la resolución del sistema [21]. Los modelos usan simplificaciones que resuelven numéricamente el problema y dan una solución aproximada. Entre los modelos más conocidos tenemos la simulación numérica directa (DNS), simulación de grandes remolinos (LES), simulación implícita de grandes remolinos (ILES) y las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS), el cual es un modelo de dos ecuaciones.

1.8.1. Modelos k-épsilon y k-omega

Los modelos de dos ecuaciones pueden predecir las propiedades de un flujo turbulento dado sin conocimiento previo de la estructura de turbulencia [22]. Los modelos k épsilon ($k - \epsilon$) y k omega ($k - \omega$) son modelos RANS de dos ecuaciones los cuales toman en cuenta los efectos de convección y difusión de energía turbulenta.

El modelo $k - \epsilon$ se usa para estudios de robustez en los que buscamos estabilidad numérica en zonas de flujo externo, presenta problemas al trabajar en casos de grandes gradientes de presión adversa [21]. Sus variables son la energía cinética turbulenta (k) y la disipación turbulenta (ϵ) [23].

El modelo $k - \omega$ posee un buen comportamiento del flujo entorno a las paredes [21]. Sus variables son la energía cinética turbulenta (k) y la disipación específica turbulenta (ω) [24]. El modelo usa la hipótesis de Boussinesq, para modelos con viscosidad lineal de Eddy, La ecuación 1.9 representa al tensor de estrés de Reynolds (τ_{ij}) para ecuaciones compresibles RANS [25], Los términos de la ecuación 1.9 se muestran en el Anexo III.

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (1.9)$$

1.8.2. Modelo k- ω - SST

El modelo de Transporte de Esfuerzo Cortante (SST) produce niveles de turbulencia en regiones con gran tensión normal, como son regiones de estancamiento y regiones de aceleración. El modelo $k - \omega - SST$ combina las características de los modelos $k - \omega$ y $k - \epsilon$. La implementación de $k - \omega$ ayuda a capturar la separación de flujo, se puede usar como modelo de turbulencia de bajo número de Reynolds sin funciones de amortiguamiento. Los cambios que se producen por $k - \epsilon$ son en el flujo libre, evitando el problema de la sensibilidad en las propiedades de turbulencia a la entrada [26]. El modelo depende de los valores de k y ω , por lo que la estimación de estas variables se calculan con las ecuaciones 1.10 y 1.11 respectivamente [27].

$$k = \frac{3}{2} (I |u_{ref}|)^2 \quad (1.10)$$

$$\omega = \frac{k^{0,5}}{C_\mu l} \quad (1.11)$$

1.8.3. Modelo de simulación adaptada a escala (SAS)

El modelo de simulación adaptada a escala o como se conoce en inglés *Scale Adaptive Simulation* (SAS) desarrollado por Menter, es un término sensible a las fluctuaciones resueltas [28]. En SAS, τ'_{ij} se resuelve utilizando la escala de longitud para realizar la viscosidad turbulenta [29], usando la ecuación 1.12.

$$L_{vK} = \kappa \left| \frac{\overline{U}'}{\overline{U}''} \right| \quad (1.12)$$

Los términos de la ecuación 1.12 se detallan en la Tabla A.2 del Anexo III.

1.9. Modelos de cavitación

Los modelos de cavitación trabajan con flujos en los que se reproduce cambios de fase de forma aproximada. En la simulación numérica se hace uso del supuesto de flujo homogéneo para el fenómeno [5]. Los modelos de cavitación que se encuentran por defecto en la librería de *OpenFOAM* son Merkle, Kunsz y Schnerr Sauer. El Modelo Zwart Gerber Belamri es una implementación al software realizada por Hidalgo et al. [30].

1.9.1. Modelo Zwart Gerber Belamri (ZGB)

Para la simulación del tubo Venturi y el hidroálabe plano convexo con obstáculo semicircular, se eligió el modelo de cavitación Zwart Gerber Belamri (ZGB). Este puede usarse en mezcla como en los modelos multifásicos Eulerianos [10]. El modelo se basa en la transferencia de masa entre interfases \dot{m} , derivada de la ecuación de Rayleigh-Plesset [30]. El modelo ZGB se expresa en la ecuación 1.13. Los modelos que no se detallan en este capítulo se muestran en el Anexo III.

$$\dot{m} = \begin{cases} \dot{m}^+ = F_v \frac{3 r_{nuc} (1 - \alpha) \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{\rho_l} \right)}, & \text{si } p < p_v \\ \dot{m}^- = -F_c \frac{3 \alpha \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{\rho_l} \right)}, & \text{si } p > p_v \end{cases} \quad (1.13)$$

1.10. Algoritmo

Para la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes se requiere el uso de técnicas numéricas. El software *OpenFOAM* resuelve estas ecuaciones con la ayuda de los

algoritmos SIMPLE, PISO y PIMPLE. Estos algoritmos se nombran en la Tabla 1.5. La estrategia para cualquier algoritmo numérico es encontrar un campo de presión y momento que complete la ecuación de conservación de masa [31]. En el presente estudio se utiliza el algoritmo PIMPLE.

Tabla 1. 5. Algoritmos Numéricos.

Algoritmo	Significado	Tipo de caso
SIMPLE	Semi Implicit Method of Pressure Linked Equations	Estado estable
PISO	Pressure Implicit of Split Operations	Transitorio
PIMPLE	Merged PISO-SIMPLE	Transitorio

(Fuente: [31])

1.11. Solucionador

El solucionador empleado en el presente estudio es *vinterPhaseChangeFoam*, el cual se aplica en fluidos inmiscibles, isotérmicos e incompresibles con cambio de fase [32]. El solucionador resuelve una ecuación de advección correspondiente a la fracción líquida, y para comprimir la interfaz de vapor, se introduce un término de compresión artificial $\frac{\partial \gamma}{\partial t}$ [33]. La ecuación 1.14 es empleada por el solucionador.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma(1 - \gamma)u_c) = \frac{\dot{m}}{\rho_l} \quad (1. 14)$$

1.12. Revisión bibliográfica

El fenómeno de cavitación ha despertado el interés de la ingeniería, en especial por las consecuencias que este conlleva. En este ámbito, la simulación del flujo cavitativo es muy útil para entender su formación y analizar los parámetros que intervienen en todo su desarrollo. Además, se usa la simulación para aplicaciones como diseño y prevención de daños en elementos de maquinaria hidráulica.

Algunos autores como Jian et al. realizaron simulaciones de flujo de cavitación totalmente compresible para resolver la formación de las ondas de choque en el colapso de la nube.

Se usó el software de *ANSYS-Fluent* con el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ RNG y el modelo de cavitación ZGB. En el estudio se encontró dos picos de alta presión durante un ciclo de cavitación, relacionados con el desprendimiento y el colapso, los cuales contribuyen al crecimiento gradual del daño por erosión. Los autores concluyen que su trabajo muestra un gran potencial para el futuro desarrollo de técnicas para predicciones precisas de la erosión por cavitación, sólo por medios numéricos [34].

Por otra parte, Petrovsek et al. realizaron una observación simultánea de las estructuras de cavitación y la superficie de una lámina de aluminio en una sección Venturi. Se usó dos cámaras de alta velocidad que muestran la secuencia en la que se puede ver la separación y el colapso de la nube, y la correspondiente aparición de la erosión por cavitación. Se concluye que el daño ocurre en el colapso de la nube de cavitación, y que el tamaño de la nube y su distancia desde la pared al colapsar, no influyen en la extensión del daño. Además, que la nube de cavitación irregular causa el mayor daño a la lámina [35].

Dular et al. realizaron una observación simultánea de estructuras de cavitación en la superficie de una sección Venturi. Se agregó una lámina delgada de aluminio sobre la superficie de prueba, debido a su tendencia de sufrir daños severos por cavitación en cortos periodos de tiempo. Además, se usó cámaras de alta velocidad que capturaron imágenes a 30 000 cuadros por segundo, con lo que se registró las estructuras de cavitación desde varias perspectivas y la superficie de la lámina. Con su trabajo concluyeron que existen cinco mecanismos de daño, siendo distintivos el colapso de la nube de cavitación esférica, tipo herradura y "twister". Además, se encontró el apareamiento de pozos en el momento de la separación de la nube de cavitación y cerca del punto de estancamiento en el cierre de la cavidad adjunta [36].

Para el caso del hidroálabe plano convexo con obstáculo semicircular (HFC), Escaler et al. se centran en el comportamiento de la cavitación inestable alrededor de un hidropiano convexo. En su trabajo se usó la implementación del modelo de cavitación ZGB con *OpenFOAM* basado en ILES, con una malla estructurada realizada con los software *Gmsh* y *Salome*. Además, se comprobó los resultados numéricos con condiciones hidrodinámicas obtenidas experimentalmente en un túnel de cavitación de alta velocidad. Se concluye que el método numérico se puede utilizar para investigar la cavitación inestable alrededor de hidropianos con precisión satisfactoria [9].

Hidalgo V. presentó un estudio en el cual desarrolla un modelo de erosión por cavitación, basado en la liberación de energía durante el colapso de las cavidades y la suposición de flujo con mezcla homogénea. En su estudio se desarrolla el modelo a partir de la

optimización de la simulación numérica de la cavitación parcial inestable, considerando condiciones asimétricas de condensación y vaporización. Aplica el modelo de cavitación de ZGB implementado en *OpenFOAM* y un modelo de turbulencia ILES. Se llevó a cabo simulaciones de los perfiles NACA0015, NACA66 y del hidroálabe plano convexo con mallas realizadas en *Gmsh* y *Salome*. Los resultados muestran el procedimiento de la cavitación inestable, la cavidad en el borde de ataque, el chorro de reingreso, el desprendimiento y colapso de la cavidad, concordando con estudios experimentales previos [5].

Por otra parte, Li Z. se centra en el comportamiento del flujo de cavitación inestable en hidropianos. Realizó un estudio sobre un NACA0015 y un hidroala NACA 0018-45 con malla estructurada, utilizando el método RANS implementado en *FLUENT*. Con su estudio logró descubrir que una reducción dinámica real de la cavitación sólo se obtiene después de atenuar la viscosidad de Eddy en la región con mayor fracción de vapor [37].

El estudio de la dinámica de fluidos puede ser desarrollados de tres maneras, experimental, teórica y numérica. La última hace referencia a CFD, la cual puede predecir el flujo del fluido entre otras aplicaciones mediante la resolución de ecuaciones matemáticas las cuales gobiernan estos procesos [38].

Los autores antes mencionados desarrollan su estudio de manera experimental y numérica, estas dos metodologías son ampliamente utilizadas en la actualidad debido a las ventajas que cada una posee. Además, el estudio numérico es realizado con distintos software de simulación de CFD como es *ANSYS Fluent* y *OpenFOAM*, con la herramienta de mallado *Salome* y *Gmsh*.

A continuación, se realiza una discusión de ventajas y desventajas del CFD con respecto al estudio experimental y de la misma manera entre los software de simulación, además, se menciona de forma general las aplicaciones del estudio numérico.

Entre las ventajas se tiene su costo relativamente bajo, su posibilidad de simular cualquier condición física y procesos reales, además tiene la capacidad de simular condiciones ideales y aislar fenómenos específicos. Se tiene información completa de un gran número de ubicaciones en la región de interés y es portable. Por otro lado, el equipo y personal para experimentos físicos son difíciles de transportar. Entre las desventajas se puede mencionar que, en experimentos, las fuentes de error son medición o perturbaciones de flujo. En simulaciones el error proviene del modelado, discretización e iteración.

En CFD no se reemplaza completamente las medidas, los resultados nunca son 100% confiables por la imprecisión de los datos. Los modelos matemáticos pueden ser inadecuados y el poder computacional no está siempre disponible. Además, las soluciones de CFD solo serán precisas según los modelos físicos en los que se basan. Resolver ecuaciones numéricamente implica errores de redondeo, debido al tamaño en el que se guarda la información, y error de truncamiento, debido a aproximaciones en los modelos numéricos que el refinamiento de la malla no puede solucionar [38].

A pesar de las desventajas antes mencionadas la simulación de CFD es una herramienta importante para el diseño de maquinaria hidráulica y predicción de daños como es la erosión por cavitación. Entre las principales aplicaciones de CFD, están el flujo y transferencia de calor en procesos industriales, propulsión y sistemas de generación de energía, análisis aerodinámico, estudio de aplicaciones de turbo maquinaria y problemas de cavitación para diseño y optimización de turbinas, compresores, componentes, entre otros [38].

Existen diversos medios que nos permiten aprovechar esta herramienta, como es el caso de software desarrollados por compañías internacionales como *ANSYS- Fluent*. El cual es un paquete de software privado que se usa para soluciones numéricas rápidas de procesos como cavitación. Al poder utilizarlo para realizar simulaciones numéricas, también se espera que su código sea abierto para poder modificarlo y mejorarlo en función de las necesidades del usuario sin ninguna limitación, lo cual no es posible con este tipo de software [5]. Otra manera de realizar el mismo trabajo es por medio de software libres de código abierto (FOSS), dicho concepto fue establecido por Richard Stallman en 1985 quien definió el concepto de software libre en cuatro libertades [39]. Estas son: libertad para ejecutar el programa por cualquier motivo, libertad de estudiar la fuente del programa y modificarlo, libertad de copiar y distribuir copias exactas en cualquier momento y sin errores, y por último, libertad de hacer y distribuir copias modificadas para beneficio de la comunidad [39].

Las cuatro libertades indican que no hay ningún bloqueo en el software libre, y que pueden ser claves importantes para el desarrollo de proyectos de investigación [5]. La licencia Pública General (GNU) y proyectos GNU garantizan el libre acceso a códigos y algoritmos, los cuales permiten a investigadores y estudiantes usar programas como *OpenFOAM*, *Salome* y *Gmsh* [40].

Salome y *Gmsh* son usados para la generación de mallas estructuradas, las cuales se realizan de forma manual por lo que requiere mayor tiempo de trabajo del usuario. Además,

es limitada para utilización en geometrías complejas, siendo estas sus principales desventajas.

El software *OpenFOAM* es una herramienta de C++, el cual es utilizado para simulación numérica en distintos campos de ingeniería como dinámica de fluidos, transferencia de calor, mecánica de sólidos, flujo de cavitación, entre otros. Una de las herramientas de *OpenFOAM* es *SnappyHexMesh*, esta se usa para crear mallas híbridas de geometrías que pueden llegar a ser complejas. Este mallado presenta distintas ventajas, entre ellas destacan la automatización de la creación de malla, alto refinamiento y bajos valores para y^+ .

Estudios numéricos previos de flujo de cavitación inestable muestran que los aspectos principales del fenómeno se pueden reproducir bastante bien utilizando el software libre *OpenFOAM*. Captando de forma precisa la formación del chorro de reingreso, generación y colapso de la nube de cavitación y los vórtices cavitantes de la corriente.

En base a estos estudios, la presente tesis trata de reproducir el fenómeno de cavitación a través del estudio numérico, con el fin de captar y analizar la formación de la cavidad en caso del tubo Venturi y la cavitación acelerada a través del obstáculo semicircular del hidroálabe plano convexo. Con la utilización de los software libre *Gmsh* y *SnappyHexMesh* permiten la mejora y adaptación para trabajos futuros de investigación, garantizando alta precisión en los resultados.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se detalla la metodología utilizada para el estudio numérico del flujo cavitativo alrededor de geometrías complejas, yAnexo por consiguiente, el procesamiento y análisis de datos.

2.1. Estrategia metodológica

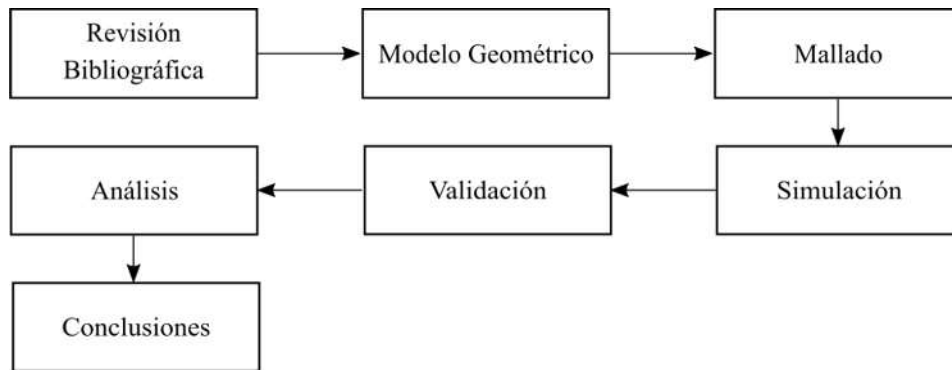


Figura 2. 1. Esquema de la metodología de estudio numérico del flujo cavitativo alrededor de un tubo Venturi y un hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular.
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.1 se detalla la metodología usada para el estudio del flujo cavitativo en los casos de estudio. En primera instancia se realiza la revisión bibliográfica de estudios previos semejantes al tema. Seguido a eso, se obtiene el modelo geométrico para lograr el mallado bidimensional del caso Venturi y el mallado tridimensional del hidroálabe plano convexo con obstáculo semicircular. Para ello, se utiliza el software *Gmsh* y la herramienta *SnappyHexMesh* de *OpenFOAM*, respectivamente. Continuo a esto, se realiza la simulación numérica de los casos en *OpenFOAM*, las cuales se validan con publicaciones de casos semejantes. Para la validación del caso Venturi, se seleccionan los estudios “*On the mechanisms of cavitation erosion – Coupling high speed videos to damage patterns*” [36] y “*Combined numerical and experimental investigation of the cavitation erosion process*” [34]. Para el caso del hidroálabe plano convexo, el estudio “*Numerical study on unsteady cavitating flow and erosion based on homogeneous mixture assumption*” propuesto por Hidalgo V. Finalmente, se presenta el análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

2.2. Modelo Geométrico

Una vez realizada la revisión bibliográfica, se procede con la obtención del modelo geométrico. El esquema sólido es obtenido con ayuda de programas CAD, como se

muestra en la Figura 2.2. Los software de diseño *SolidWorks* y *AutoDesk Inventor* pueden ser utilizados para el modelado geométrico al igual que *FreeCAD*, con diferencia del tipo de licencia que maneja cada uno. En este trabajo se utiliza *SolidWorks* para exportar los sólidos en formatos .STL. Dado el caso en el que la resolución del formato .stl no exporte de manera adecuada todos los detalles, se opta por el uso de software inventor para exportar formatos tanto en formato .stl o .obj. El uso de *FreeCAD* para la generación de nuevos objetos (.obj, .stl) es debido a que *SolidWorks* no puede exportarlos directamente con los formatos correctos. Al final los nuevos objetos permiten la definición de partes, posicionamiento respecto a los ejes de coordenadas y ayudan en la posterior ubicación de zonas de refinamiento.

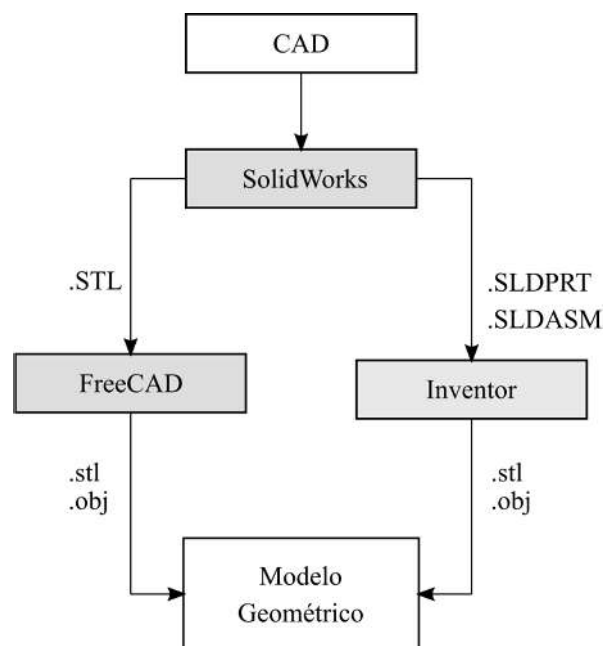


Figura 2. 2. Esquema metodológico para la obtención del modelo geométrico.
(Fuente: Propia)

2.2.1. Modelo geométrico tubo Venturi

Para la generación de la geometría de sección de tubo Venturi, se consideró de las medidas consideradas en los estudios de Dular et. al [34] [35], tal como se muestra en la Figura 2.3.

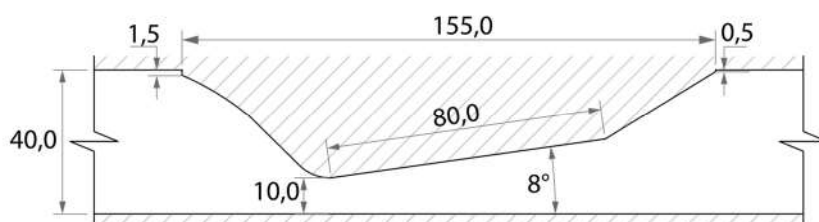


Figura 2. 3. Medidas geometría tubo Venturi [mm].
(Fuente: [34])

2.2.2. Modelo geométrico de un Hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular (HFC)

Para la generación del modelo geométrico del HFC, se obtiene las medidas a partir de estudios previos experimentales, realizados por Escaler et al [41]. y una simplificación realizada por Hidalgo V. [5], tal como se indica en la Figura 2.4.

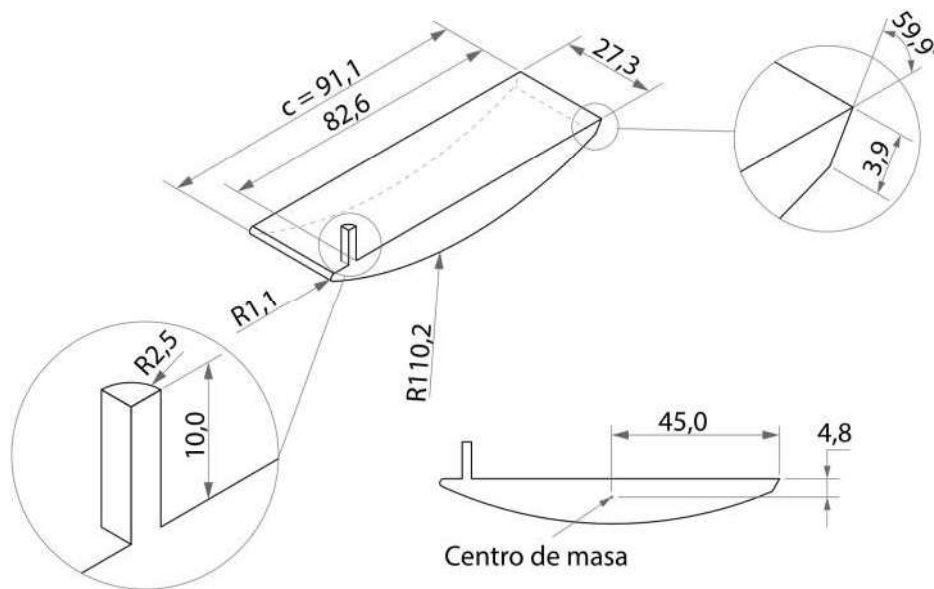


Figura 2. 4. Medidas geometría HFC [mm].
(Fuente: [41] [5])

2.3. Dominio Computacional

2.3.1. Caso Venturi

Para el estudio de este caso, se ubicó la sección Venturi dentro del dominio computacional, definido por la longitud de cuerda "c". Se incrementó la distancia de la entrada y salida de flujo a dos y cuatro veces el valor de la cuerda, respectivamente [21]. El valor de la cuerda es de 0,15 m tal como se muestra en la Figura 2.5.

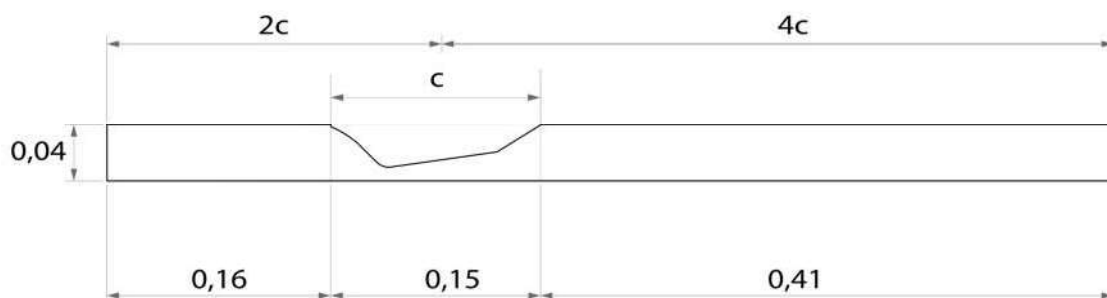


Figura 2. 5. Dominio del tubo Venturi en función de la longitud de cuerda [m].
(Fuente: Propia)

Una vez definido el dominio se nombraron las diferentes zonas, tal como se muestra en la Figura 2.6. Se asignó la nominación “in” y “out” para la entrada y salida de flujo, “top” y “bot” para las paredes superiores e inferiores y “fab” para las paredes frontales y posteriores. Se consideró un espesor de 10 mm para lograr identificar la entrada y salida de flujo.

Estas nominaciones se hicieron con la finalidad de establecer zonas de refinamiento durante el mallado y asignar las distintas condiciones de borde.

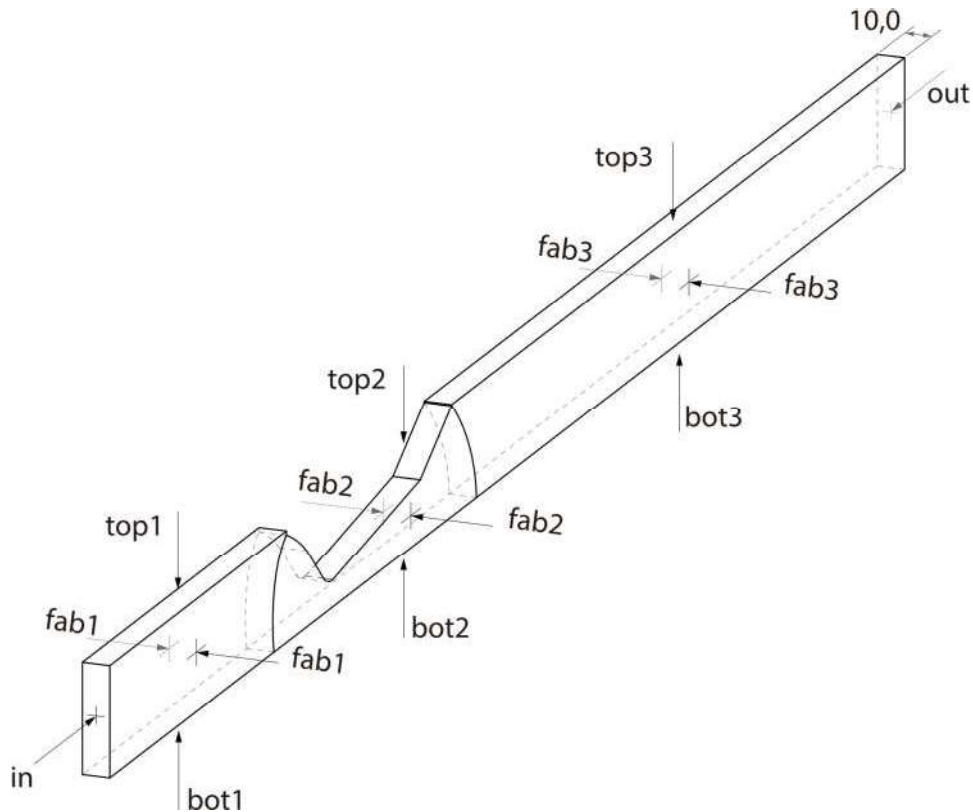


Figura 2. 6. Descripción del dominio computacional del tubo Venturi.
(Fuente: Propia)

2.3.2. Caso HFC

La Figura 2.7 muestra el dominio computacional en función de la longitud de cuerda “c” del hidroálabe, cuyo valor es de 0,091 m. No se asignan los mismos nombres a las zonas como en el caso anterior debido a que la geometría expuesta en la sección 2.2.2 es una simplificación de la geometría real usada en las pruebas experimentales por Escaler et al. [42], esto se da para ahorrar los recursos computacionales.

Se establecieron la nominación “in” y “out” para la entrada y salida del flujo, “top” y “bottom” para las paredes superior e inferior, “wing” para las paredes del hidroálabe, por último “front” y “back” para las caras de simetría.

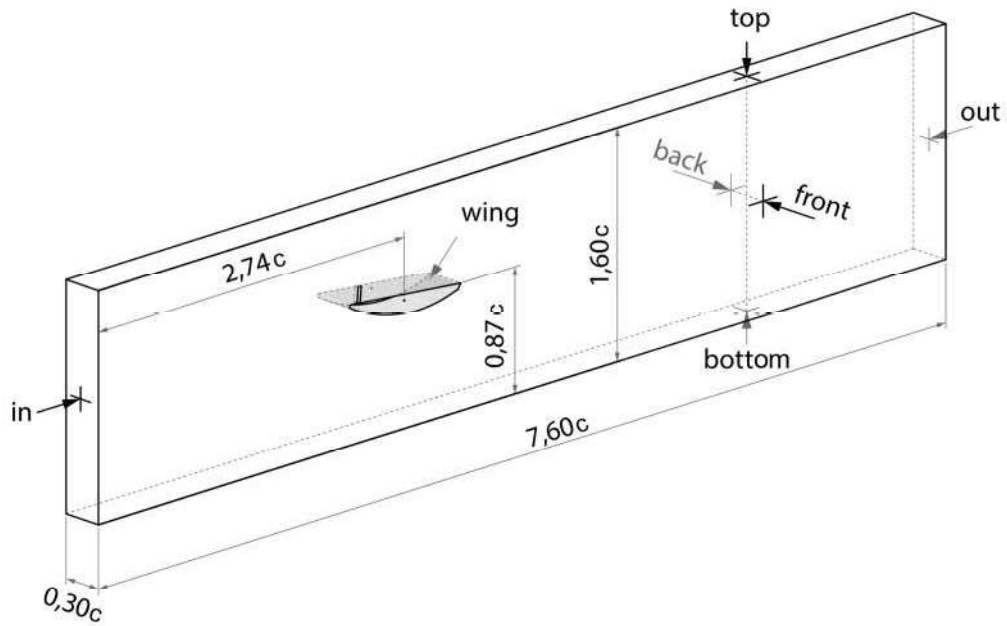


Figura 2. 7. Descripción del dominio computacional del HFC [m].
(Fuente: [43])

2.4. Generación de Malla

El análisis del comportamiento del fenómeno y los métodos computacionales de resolución de ecuaciones diferenciales, son desarrollados gracias a la generación de mallas. Se entiende por malla a la discretización del dominio de estudio, es decir, división del dominio general en pequeños volúmenes en los cuales se resuelven las ecuaciones algebraicas [21]. Para la obtención del mallado 2D y 3D se parte del modelo geométrico de cada caso. Para el caso en 2D se necesitan puntos característicos que hayan permitido definir la geometría y para el 3D se necesita superficies de la geometría en formato .stl o .obj.

De manera continua, se utilizan la herramienta computacional *Gmsh* para la obtención del mallado Venturi y *SnappyHexMesh* para el mallado del HFC. La metodología de esta sección se muestra en la Figura 2.8.

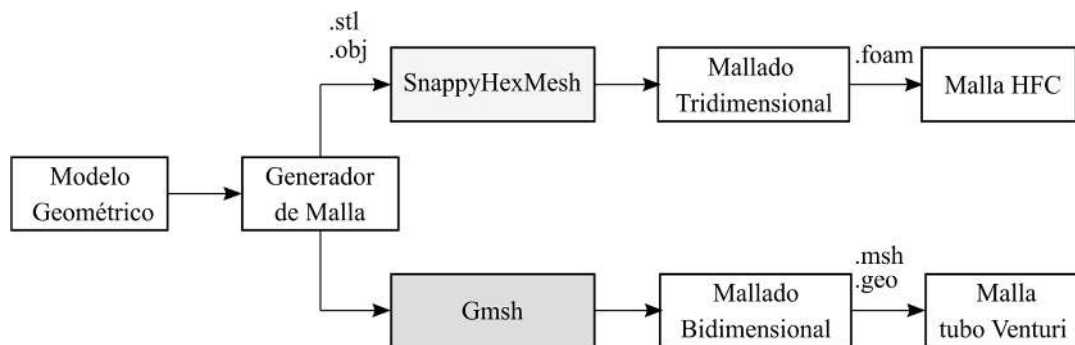


Figura 2. 8. Esquema para generación de malla.
(Fuente: Propia)

2.4.1. Mallado bidimensional (2D) tubo Venturi

El software *OpenFOAM* brinda la oportunidad de importar mallas desde otros software transformando el programa mediante comandos propios. Gracias a ello, fue posible usar el software libre *Gmsh* para la generación de malla para el análisis bidimensional del tubo Venturi. En la Figura 2.9. se muestra la metodología para la obtención de esta malla.

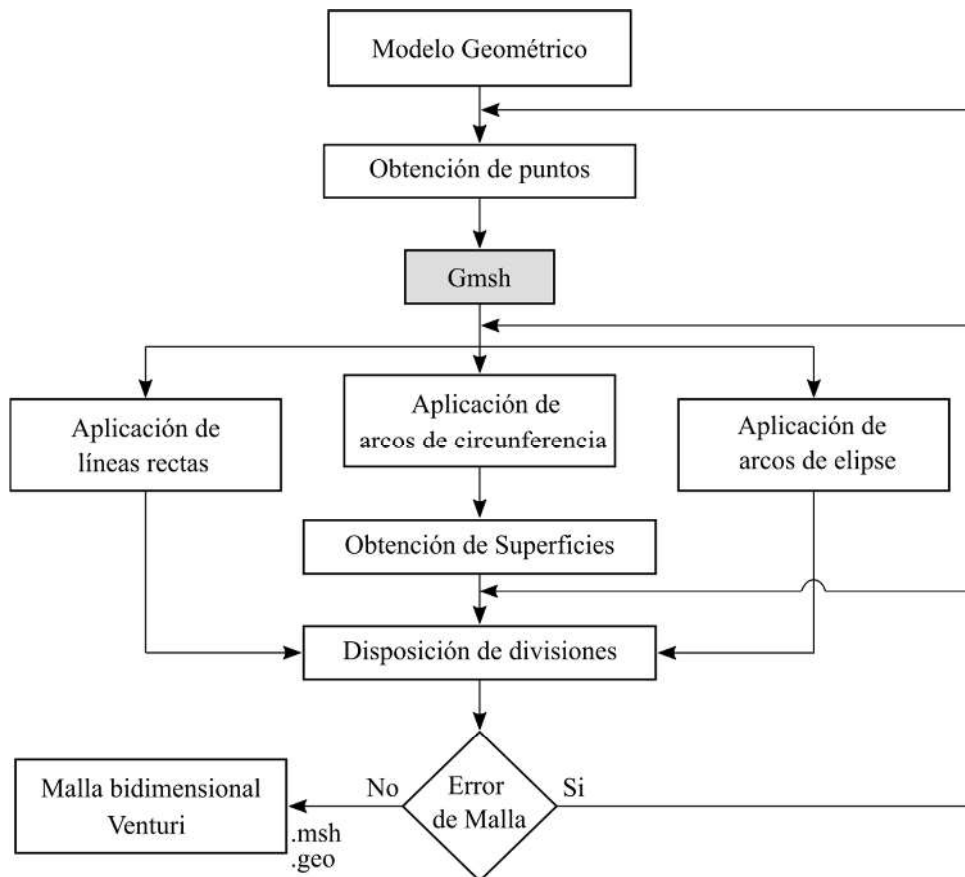


Figura 2. 9. Metodología para obtención de malla 2D Venturi.
(Fuente:Propia)

Para lograr generar la malla estructurada en todo el dominio, fue necesario considerar 27 puntos y 10 superficies, tal como se muestra en la Figura 2.10. Para obtener las coordenadas de cada punto fue necesario crear una geometría general mediante un programa de diseño para extraerlos de acuerdo con lo que se requiera. De esta manera se consigue una correcta distribución de estos y así lograr ubicar las superficies correspondientes.

Se crea la malla evitando un sesgo alto y un cambio brusco de ortogonalidad, para ello se identifican las líneas que deben tener las mismas propiedades y divisiones como se indica en la Figura 2.11.

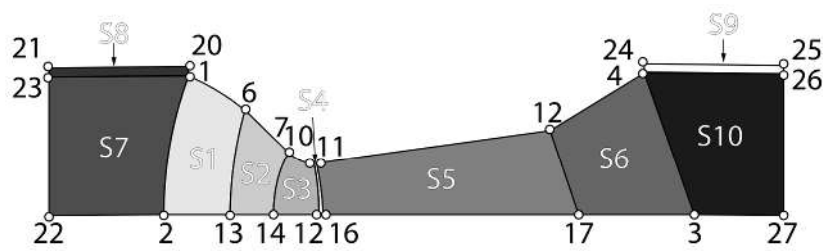


Figura 2. 10. Puntos y secciones del dominio Venturi.
(Fuente: Propia)

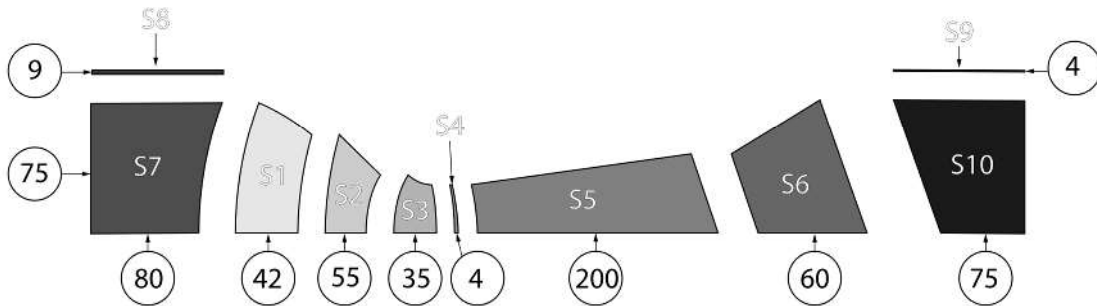


Figura 2. 11. División de líneas de cada sección del dominio Venturi.
(Fuente: Propia)

Con la finalidad de obtener una buena calidad de malla y evitar inducción de resultados, se realiza un mayor refinamiento en la zona de estudio, Figura 2.12. Para ello, nos enfocamos en el extremo superior e inferior de la geometría y variamos los parámetros de progresión horizontal de cada superficie hasta lograr una transición suave. La malla está dispuesta en la dirección "x-z", y al ser considerada en dos dimensiones, la dirección en "y" tiene un espesor despreciable. El código *Gmsh* está disponible en el Anexo IV. El software de *Gmsh* fue utilizado con su versión 3.0.6, es importante mencionar que los códigos pueden variar al utilizarlos en versiones distintas a esta.

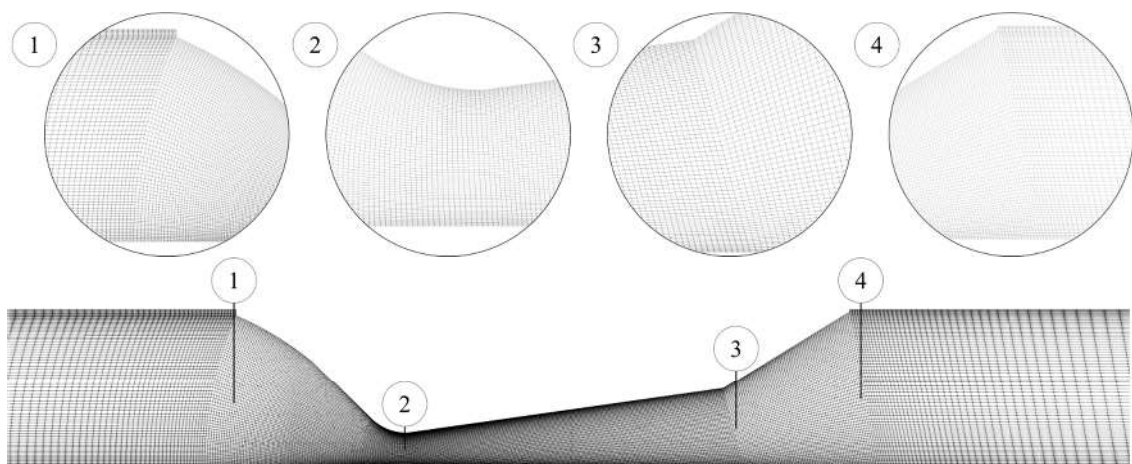


Figura 2. 12. Malla 2D Venturi obtenida en Gmsh.
(Fuente: Propia)

2.4.2. Mallado tridimensional (3D) HFC

Para el análisis tridimensional se empleó mallas hexaédricas realizadas con la herramienta *SnappyHexMesh* de *OpenFOAM* siguiendo la metodología que se muestra en la Figura 2.13. Se parte de la geometría sólida del HFC obtenida en la sección 2.2.2., el modelo geométrico se ingresa dentro del *blockMesh*, el cual es la malla base del dominio computacional. En *surfaceFeatureExtractDict*, se definen las partes de la geometría donde se requiere refinamientos, según las divisiones hechas anteriormente con *FreeCAD*. Todo esto se comprueba visualmente con la aplicación de código abierto *ParaView*.

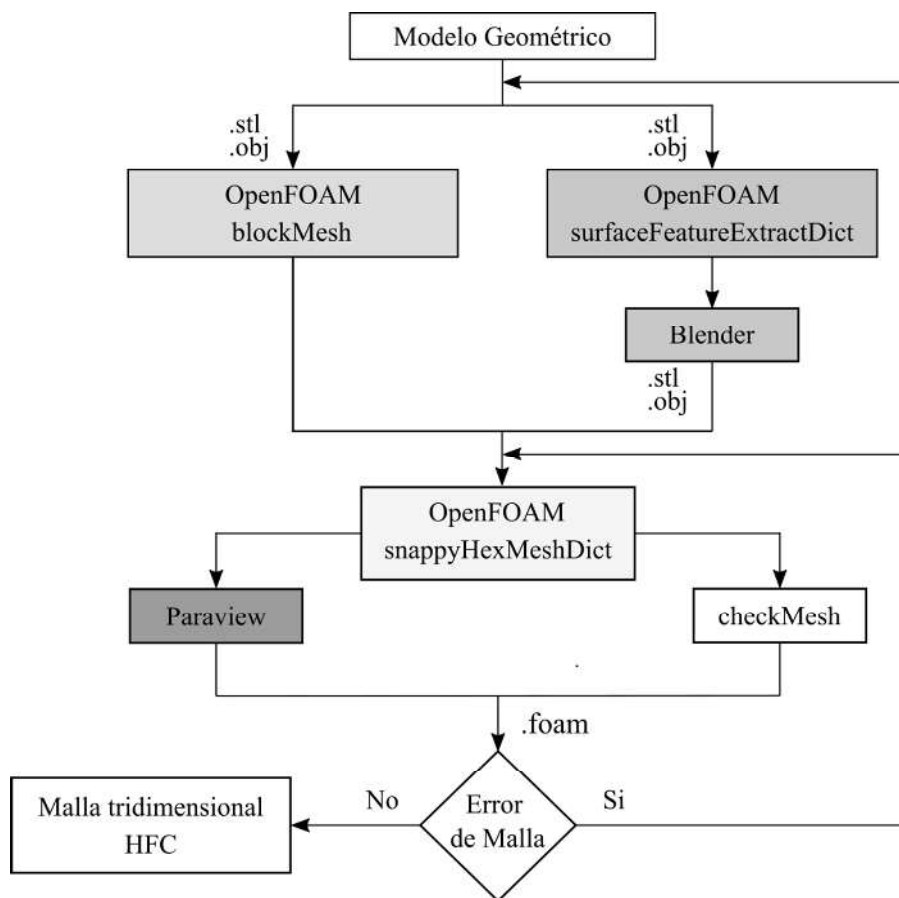


Figura 2. 13. Metodología para obtención de malla 3D para el HFC.
(Fuente: Propia)

Se utilizó dos mallas con diferentes combinaciones en el uso de las herramientas *blockMesh* y *SnappyHexMesh*, además de varias configuraciones al exportar las geometrías en los programas CAD.

Se siguió la misma metodología para la obtención de dos mallas con distinta configuración, las mismas que están denominadas como “malla 1” y “malla 2”. La descripción de la configuración de cada una se realiza a continuación.

La primera malla (malla 1) híbrida tipo H combina la herramienta *blockMesh*, que genera un mallado base, y la herramienta *SnappyHexMesh*, la cual genera mallas tridimensionales que contienen hexaedros a partir de geometrías de superficie triangulada. La malla se adapta mediante el refinamiento iterativo. El mallado base para esta combinación es más grande que el dominio computacional y está rotado a 3° con respecto al eje “x”. Esto ayuda a que la malla se alinee y acople de mejor manera a la geometría. La geometría fue dividida en zonas, las cuales fueron exportadas en formato STL de programas CAD con la resolución presentada en la Tabla 2.1. La Figura 2.14 detalla esquemáticamente como las celdas de la malla se acoplan de forma paralela al obstáculo, además de una imagen de la “malla 1” finalizada con algunos detalles cerca del HFC. En la imagen se observa que las celdas son uniformes y no existen distorsiones abruptas.

Tabla 2. 1. Resolución personalizada para HFC usado en la “malla 1”.

Nombre	Valor
Surface Deviation	98,734 %
Normal Deviation	27,770
Max Edge Length	0,100 %
Aspect Ratio	0,500

(Fuente: Propia)

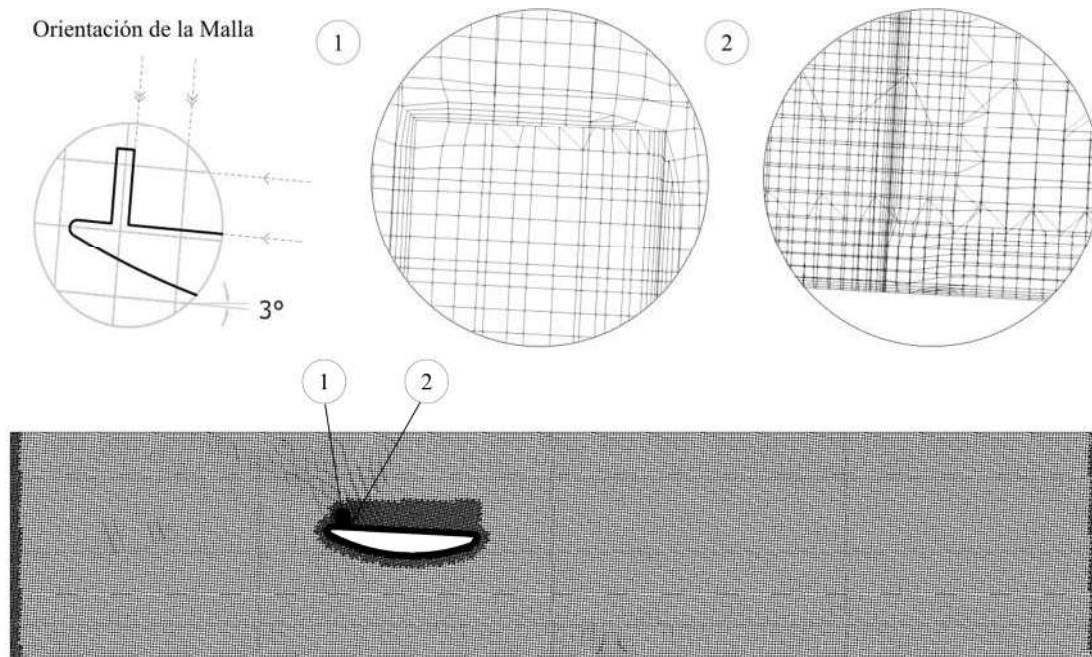


Figura 2. 14. Detalles del mallado 3D del HFC con el uso de *blockMesh* rotado a 3°.
(Fuente: Propia)

La segunda malla (malla 2) combina las herramientas *blockMesh* y *SnappyHexMesh* de forma diferente. La herramienta *blockMesh* tiene las mismas dimensiones que el dominio computacional mostrado en la sección 2.3.2, es un bloque de celdas regulares sin ninguna rotación. Cada cara del bloque lleva los mismos nombres del dominio, y el código incorpora las condiciones de borde de casi todas las superficies con excepción del HFC. La geometría para este caso está constituida únicamente por el hidroálabe plano convexo, y la mitad del obstáculo semicircular. La resolución fue guardada en formato STL, los valores se detallan en la tabla 2.2. La herramienta *SnappyHexMesh* es la que se encarga de incorporar la geometría a la malla base, los espacios en los que la geometría y la base coinciden son eliminados. El refinamiento se da únicamente a las paredes del HFC. La Figura 2.15 muestra una vista horizontal de la “malla 2” terminada con algunos detalles.

Tabla 2. 2. Resolución personalizada para HFC usado en la “malla 2”.

Nombre	Valor
Surface Deviation	98,734 %
Normal Deviation	32,700
Max Edge Length	0,100 %
Aspect Ratio	0,300

(Fuente: Propia)

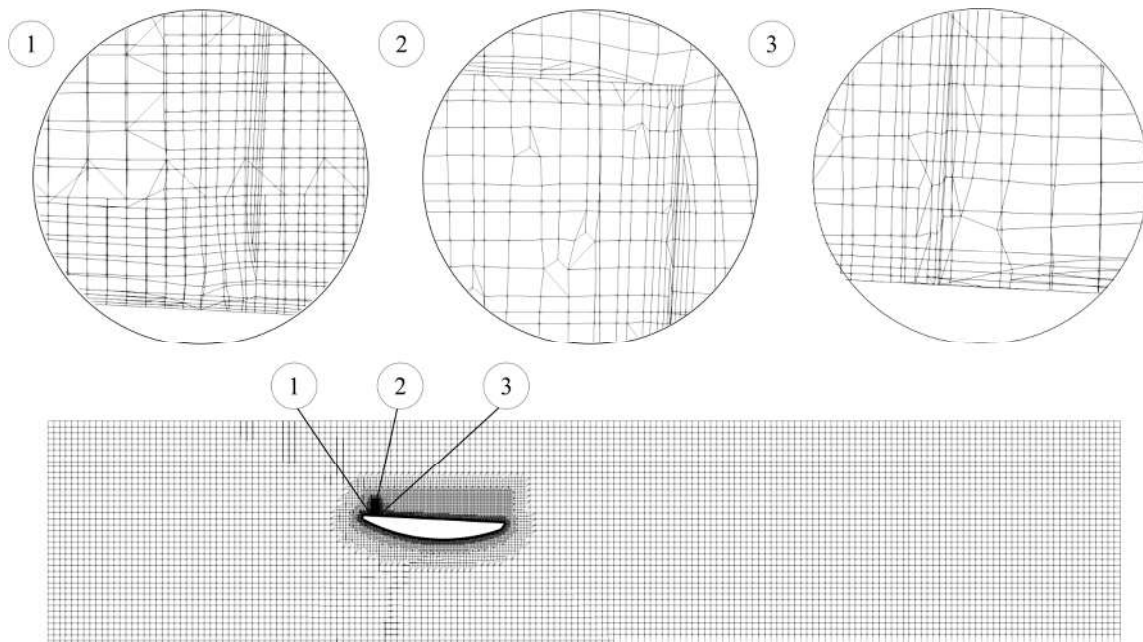


Figura 2. 15. Mallado 3D del HFC con el uso de *blockMesh* y *SnappyHexMesh*.
(Fuente: Propia)

2.5. Simulación con *OpenFOAM*

Para el presente caso de estudio se utilizó la versión 4.1 de *OpenFOAM* en el sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS de distribución Linux basada en Debian. Además, se usó una *Work Station* con procesador Xeon (R) Silver 4116, el cual posee 12 núcleos y 24 threads. Su capacidad de memoria de acceso aleatorio es de 128 GiB DDR42666 MHz y su memoria de intercambio es de 128 GiB en disco sólido. La Figura 2.16 muestra el desarrollo en el software para el estudio del flujo cavitativo. El esquema consta de dos partes, la primera parte corresponde a la simulación del flujo cavitativo con la implementación del solucionador *vInterPhaseChangeFoam*. La segunda parte se enfoca en el procesamiento y visualización de resultados para el fenómeno simulado. Los resultados pueden ser procesados para análisis directo usando la herramienta *ParaView* y a la vez un análisis indirecto al visualizar el comportamiento de los residuales de acuerdo con el número de iteraciones, con el uso de la herramienta *Gnuplot*.

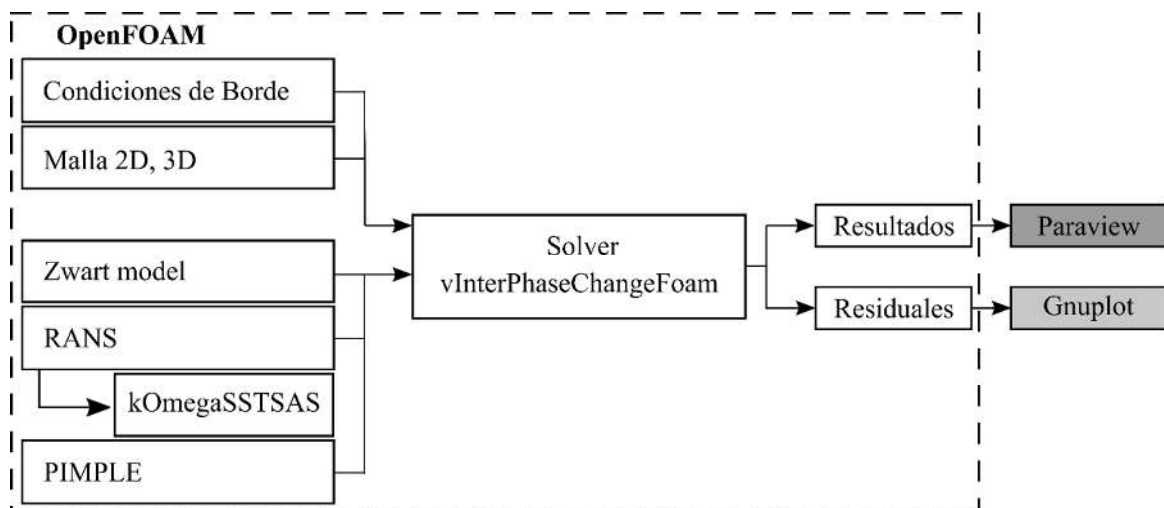


Figura 2.16. Desarrollo del software para el estudio de cavitación.
(Fuente: Propia)

2.6. Criterios para la calidad de malla

Sin tomar en cuenta el tipo de malla (estructurada, no estructurada o híbrida), la calidad de esta es imprescindible para soluciones confiables en CFD. Las desviaciones como cambios abruptos en el tamaño de las celdas, distorsión o relación de aspecto, crean dificultades en la convergencia de la solución numérica. Existen varios criterios para evaluar la calidad de malla como es el criterio y^+ , el número omega Ω y el número de Courant Co . Los mismos que se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Datos experimentales obtenidos para el tubo Venturi.

Nombre	Ecuación	Descripción
Criterio Y Plus	$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$	Es un valor adimensional que describe el valor medio de la pared hidrodinámica en una malla [40]. Su rango aceptable en modelos <i>SST</i> es menor a 300 [44] [45] [46].
Número Omega	$\Omega = \frac{NE}{ND}$	El número omega determina el recurso computacional que requiere la simulación al relacionar el número total de elementos con el número total de nodos de la malla [47]. Es un valor adimensional, si incrementa omega el recurso computacional también incrementa. No posee un rango fijo y depende del caso, se busca que en una comparación los valores sean iguales.
Número de Courant	$Co = \frac{u \Delta t}{\Delta x}$	Proporciona una medida de la velocidad a la que se transporta la información bajo la influencia de un campo de flujo en un paso de tiempo al tamaño de la celda de malla, es un factor limitante para el desempeño de los esquemas numéricos [48]. El rango aceptable es $0 < Co \leq 1$ [49].

(Fuente: Propia)

2.7. Condiciones de borde

Los dominios computacionales, tanto del tubo Venturi como del HFC, presentan las mismas condiciones de flujo al trabajar en estado transitorio con un fluido incompresible newtoniano, sin embargo, los dominios presentan diferentes configuraciones para las condiciones de borde y condiciones iniciales.

2.7.1. Condiciones de borde Venturi

La Tabla 2.4 muestra las condiciones con las que se trabajó en el estudio experimental realizado por Dular. et al., sobre las estructuras de cavitación y erosión [35]. La velocidad alcanzada en la garganta del tubo Venturi está representada por U, la presión absoluta de operación del equipo de pruebas por P, el número de cavitación σ , y el número de Reynolds por Re.

Tabla 2. 4. Datos experimentales obtenidos para el tubo Venturi.

Variable	U	P	σ	Re
Unidades	[m/s]	[kPa]	-	-
Tubo Venturi	24,700	454,000	1,480	247.000,000

(Fuente: [35])

La Tabla 2.5. detalla las condiciones de borde del dominio computacional usadas para la simulación del tubo Venturi en 2D. Como se puede apreciar, la entrada “in” y salida del dominio “out” se encuentran definidas con la condición tipo “patch”. Las paredes frontales y posteriores “fab”, se definen como vacío “empty”, y las paredes superiores “top” e inferiores “bot” se definen como pared “wall”.

Tabla 2.5. Condiciones de borde para el dominio computacional caso Venturi.

in	out	fab	top	bot
		1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
patch	patch	empty	wall	wall

(Fuente: Propia)

Además de las condiciones del dominio, se incluyen las condiciones iniciales de las variables del caso de estudio. Para el caso Venturi fue necesario calcular las condiciones iniciales de velocidad y presión basándose en los valores obtenidos experimentalmente. Adicionalmente, se calcularon los valores de energía cinética turbulenta, k (*turbKE*), y la tasa de disipación específica de turbulencia, ω (*turbulentOmega*), del modelo de turbulencia $k - \omega$ SST SAS.

La Tabla 2.6 muestra los valores de las condiciones iniciales para el caso del tubo Venturi y el detalle de los cálculos de estas variables se muestran en el Anexo VII (condiciones de entrada de velocidad y presión) y Anexo VIII (variables del modelo de turbulencia).

Tabla 2. 6. Condiciones iniciales para el caso Venturi.

Nombre	Valor
Velocity, U [m/s]	6,175
Pressure, P [KPa]	-107,084
turbKE, k [m^2/s^2]	0,083
turbulentOmega, ω [$1/s$]	1,900

(Fuente: Propia)

En las Tablas 2.7 y 2.8, se observa las condiciones de borde del dominio en base a las variables del caso de estudio, la descripción de estas se encuentra en el Anexo VI.

Tabla 2. 7. Condiciones de borde para cada variable del caso.

Boundary	in	out	fab 1, 2, 3
alpha.water	fixedValue	zeroGradient	empty
k	fixedValue	zeroGradient	empty
nut	calculated	calculated	empty
omega	fixedValue	inletOutlet	empty
p_rgh	zeroGradient	totalPressure	empty
U	fixedValue	zeroGradient	empty

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 8. Condiciones de borde para cada variable del caso.

Boundary	top 1, 2, 3	bot 1, 2, 3
alpha.water	zeroGradient	zeroGradient
k	kqRWallFunction	kqRWallFunction
nut	nutkWallFunction	nutkWallFunction
omega	omegaWallFunction	omegaWallFunction
p_rgh	zeroGradient	zeroGradient
U	noSlip	slip

(Fuente: Propia)

2.7.2. Condiciones de borde HFC

La Tabla 2.9 resume las condiciones con las que se llevó a cabo las pruebas experimentales de cavitación-erosión en hidroálabes. La velocidad de flujo libre es representada por U_{∞} , la presión como p_{∞} , el número de cavitación por σ , y el ángulo de ataque con \widehat{AOA} .

La longitud de la cuerda del hidroálabe está definida como “c” [41].

Tabla 2. 9. Datos experimentales obtenidos para el HFC.

Variable	U_{∞}	p_{∞}	σ	\overline{AOA}	c
Unidades	[m/s]	[kPa]	-	°	[mm]
HFC	35,000	613,600	1,000	3,000	91,100

(Fuente:[41])

La Tabla 2.10 detalla las condiciones de borde del dominio computacional usadas para la simulación del HFC. El dominio computacional se mostró en la Figura 2.7 de la sección 2.2. Se asigna, la entrada “in” y salida del dominio “out” se encuentran definidas con la condición tipo *patch*, las paredes frontales y posteriores “front & back” se definen como planos de simetría “symmetry”, las paredes del HFC “wing”, se definen como “Wall”, y la pared superior “top” e inferior “bottom” se define como pared (wall). Las paredes del HFC “wing” se dividen en dos zonas, “w1” para las paredes del hidroálabe y “obs1” para las paredes del obstáculo.

Tabla 2. 10. Condiciones de borde para el dominio computacional del HFC.

in	out	front	back	top	bottom	wing
patch	patch					
Velocidad [m/s]	Presión [kPa]	symmetry	symmetry	wall	wall	wall
$U_{\infty} = 35,0$	$p_{\infty} = 613,3$					

(Fuente: Propia)

Los cálculos de condiciones iniciales para el modelo de turbulencia *k – ω SST SAS* en el caso del HFC fueron únicamente de las variables de energía cinética turbulenta, *k* y de la tasa de disipación específica de turbulencia, *ω*. Los resultados se muestran en la Tabla 2.11. Los cálculos se encuentran detallados en el Anexo IX.

Tabla 2. 11. Condiciones iniciales para el caso HFC.

Nombre	Valor
Velocity, U [m/s]	35,000
Pressure, P [KPa]	613,600
turbKE, <i>k</i> [m^2/s^2]	0,183
turbulentOmega, <i>ω</i> [$1/s$]	52,282

(Fuente: Propia)

En las Tablas 2.12 y 2.13, se observa las condiciones de borde del dominio en base a las variables del caso de estudio, la descripción de estas se encuentra en el Anexo VI.

Tabla 2. 12. Condiciones de borde para cada variable del caso.

Boundary	in	out	front back
alpha.water	fixedValue	inletOutlet	symmetry
k	fixedValue	inletOutlet	symmetry
nut	fixedValue	freestream	symmetry
omega	fixedValue	inletOutlet	symmetry
p_rgh	zeroGradient	fixedValue	symmetry
U	fixedValue	inletOutlet	symmetry

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 13. Condiciones de borde para cada variable del caso.

Boundary	top bottom	obs1 w1
alpha.water	slip	zeroGradient
k	slip	kqRWallFunction
nut	slip	nutUSpaldingWallFunction
omega	slip	omegaWallFunction
p_rgh	slip	zeroGradient
U	slip	noSlip

(Fuente: Propia)

2.8. Variables del modelo de cavitación ZGB

Para este trabajo se tomaron los valores recomendados por Morgut et al. [50] para los valores del r_{nuc} , de la constante de F_v para el caso Venturi y del F_c para el caso del HFC. Por otra parte, se consideró los valores predeterminados del modelo para el F_c del caso Venturi y para el F_v para el HFC. El valor del R_B fue tomado de acuerdo al trabajo realizado por Zhang et al. [51]. Estos valores se muestran en la Tabla 2.14.

Tabla 2. 14. Coeficientes para el modelo ZGB en cada caso de estudio.

Coeficientes ZGB	HFC	Tubo Venturi
F_v	50,000	300,000
F_c	0,030	0,010
r_{nuc}	$5,000 e^{-6}$	$5,000 e^{-6}$
R_B	$1,000 e^{-6}$	$1,000 e^{-6}$

(Fuente: [50])

2.9. Estructura del caso de estudio

El estudio presenta dos casos, ambos se enfocan en el fenómeno del flujo cavitativo. Las geometrías empleadas se especifican en la sección 2.2. El caso 2D difiere en dos aspectos importantes al 3D, el primero es el cambio de las condiciones de borde en el dominio computacional y el segundo la incorporación de la malla. En forma general los casos están conformados por tres directorios, *0.orig*, *constant* y *system*. El contenido de los directorios se muestra en la Figura 2.17.

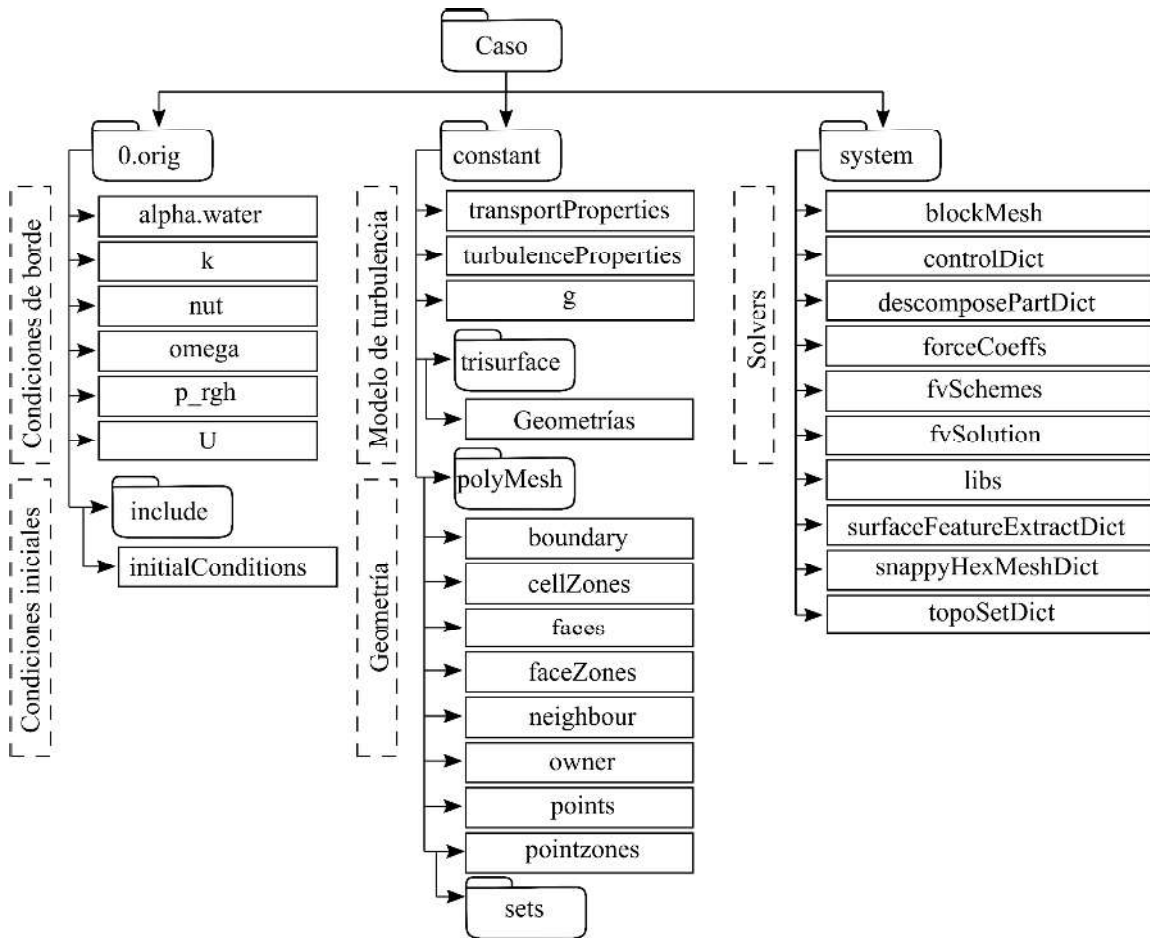


Figura 2. 17. Estructura del caso de estudio.
(Fuente: Propia)

2.9.1. Directorio *0.orig*

El directorio está conformado por seis archivos y un subdirectorio. El subdirectorio es nombrado como *include*, contiene el archivo *initialConditions* el cual se detalla en la Tabla 2.15. Las condiciones de borde del dominio de estudio se encuentran en los archivos *alpha.water*, *k*, *nut*, *omega*, *p_rgh* y *U*, y representan a los campos de agua y vapor, energía cinética turbulenta, viscosidad turbulenta, tasa de disipación específica turbulenta, la presión estática y la velocidad, respectivamente.

Tabla 2. 15. Descripción del archivo initialConditions.

Nombre	Descripción
flowVelocity	Velocidad en la entrada de los dominios en la dirección x [m/s]
pressure	Presión de trabajo [Pa]
turbulentKE	Energía cinética turbulenta [m ² /s ²]
turbulentOmega	Tasa de disipación específica de turbulencia [s ⁻¹]
nut	Campo de viscosidad turbulenta [m/s]

(Fuente: Propia)

2.9.2. Directorio *constant*

El directorio está conformado por tres archivos y tres subdirectorios. El archivo *transportProperties* contiene las propiedades de fase de vapor y líquido del fluido. Se indica la viscosidad cinemática, densidad, presión de saturación, tensión superficial y los coeficientes del modelo ZGB detallados en la Tabla 2.14. El archivo *turbulenceProperties* hace referencia a el modelo de turbulencia. En los dos casos se emplea el modelo de simulación promediada de Reynolds (RAS) con *kOmegaSST SAS*. La aceleración de la gravedad está contenida en el archivo *g*.

El subdirectorio *trisurface* contiene las geometrías de cada caso, únicamente para el tubo Venturi en 2D esta carpeta no existe debido al uso del software *Gmsh*. El subdirectorio *polyMesh* contiene ocho archivos los cuales describen el formato de malla en listados de puntos, caras, celdas, celdas vecinas, entre otras especificaciones. A su vez incorporan todas las condiciones de los límites, los archivos son generados automáticamente por *SnappyHexMesh* al ser ejecutado. El último directorio se crea por defecto al usar el *Gmsh* en el caso del HFC se debe correr la aplicación *topoSet*.

2.9.3. Directorio *system*

El directorio *system* permite establecer parámetros asociados con el procedimiento de solución, en este se configuran los parámetros de control de ejecución, parámetros para salida de datos, entre otros. El directorio está conformado por diez archivos denominados *blockMesh*, *controlDict*, *decomposePartDict*, *forceCoeffs*, *fvSchemes*, *libs*, *surfaceFeatureExtractDict*, *snappyHexMeshDict* y *topoSetDict*. La descripción de cada uno de estos archivos se muestra en la Tabla 2.16.

Tabla 2. 16.Descripción de los archivos en el directorio system.

Nombre	Descripción
blockMesh	Crea mallas paramétricas simples, descompone las geometrías del dominio computacional en conjuntos de bloques hexaédricos tridimensionales.
controlDict	Establece los parámetros para la creación de la base de datos.
decomposePartDict	Divide el dominio computacional, ejecuta el caso en paralelo en procesadores distribuidos.
forceCoeffs	Funciones que son parte del archivo controlDict
fvSchemes	Establece esquemas numéricos para los términos (esquemas de tiempo, gradiente, divergencia, laplacianos, interpolación, entre otros).
fvSolution	Especifica los solucionadores para cada ecuación discretizada, el algoritmo que resuelve las mismas y otros parámetros. En ambos casos de estudio se emplea el algoritmo PIMPLE.
libs	Lista de bibliotecas adicionales que se cargan en la ejecución y son parte del archivo controlDict.
surfaceFeatureExtractDict	Extrae características de las geometrías
snappyHexMeshDict	Genera mallas tridimensionales automáticamente a partir de las geometrías (stl,obj), la malla se adapta iterativamente a la malla generada por blockMesh acoplado la malla hexagonal a las superficies.
topoSetDict	Crea un conjunto de celdas antes de ejecutar el solucionador.

(Fuente: [52])

2.10. Postproceso y comparación de resultados

Una vez obtenidos los resultados numéricos de la simulación y estudios previos, se realiza el post procesamiento para la validación del caso, además del análisis de resultados y conclusiones, como se muestra en la Figura 2.18.

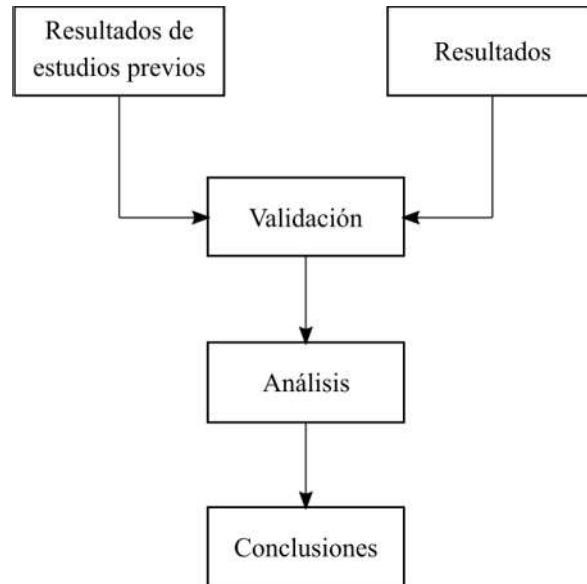


Figura 2. 18. Esquema del procesamiento de resultados.
(Fuente: Propia)

Con la ayuda de la herramienta *Gnuplot*, visualizamos el comportamiento de los residuales en función del número de iteraciones de nuestras magnitudes físicas (*alfa_water*, *k*, *nut*, *omega* y *p*). Esto nos permite observar el comportamiento de los resultados y a su vez detectar errores en la simulación. La validación en ambos casos se hace en base a comparación de imágenes obtenidas de forma experimental y numérica en estudios previos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada una de las secciones establecidas en la metodología. Además, se presenta la comparación de los casos de estudio, tanto del tubo Venturi como del HFC, con trabajos previos. Adicionalmente, se presenta los resultados de presión absoluta en puntos críticos de la sección Venturi y la formación del chorro de reingreso. Para el HFC, se presentan gráficas comparativas del volumen total de vapor entre los casos obtenidos de la simulación de este.

3.1. Simulación para el tubo Venturi

3.1.1. Independencia de malla

La selección de la malla adecuada es importante para analizar el fluido, por tanto, es conveniente realizar el estudio de independencia de malla. Para este estudio se toma como base la cantidad de elementos en la malla, a partir del cual, si se aumenta en número los resultados son los mismos o varían de manera no significativa. Para el presente estudio se ha considerado cuatro mallas con distinta densidad. Además, se ha realizado un análisis de velocidad (U) y presión (P) en diez puntos localizados en el flujo libre a lo largo de la geometría Venturi, tal como se muestra en la Figura 3.1.

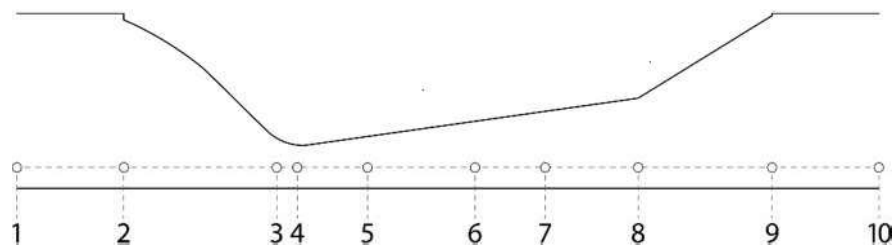


Figura 3.1. Puntos fijados en la geometría para toma de datos U y P .
(Fuente: Propia)

Es importante mencionar que los puntos “1” y “10” se ubican a la entrada y salida del dominio, respectivamente.

El análisis de independencia se realiza en el mallado bidimensional elaborado en *Gmsh* y en un tiempo de estabilización de $t = 1,500 e^{-2}$ s. En la Tabla 3.1 se muestra el análisis de la velocidad de flujo libre y en la Tabla 3.2 el análisis de presión. Se puede apreciar que, a partir de 41.036 elementos, la malla muestra independencia de resultados. En las mallas “M3” y “M4” que poseen mayor número de elementos los resultados se mantienen semejantes y en la malla “M1” la cual tiene menor densidad los resultados son variantes.

Tabla 3.1. Independencia de malla velocidad U [m/s].

N° Elementos		18.845	41.036	56.770	61.949
Puntos	distancia (x)	M1	M2	M3	M4
1	0,010	6,175	6,175	6,175	6,175
2	0,248	8,164	7,671	7,647	7,653
3	0,285	22,992	23,807	23,807	23,802
4	0,290	28,023	28,029	28,031	28,029
5	0,307	31,990	31,019	31,006	31,005
6	0,333	31,145	31,088	31,077	31,081
7	0,350	31,138	31,094	31,083	31,090
8	0,370	31,016	31,104	31,033	31,089
9	0,405	31,114	30,851	30,836	31,174
10	0,820	11,164	11,142	11,155	11,146

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.2 se puede apreciar mayor inestabilidad de resultados con respecto a la Tabla 3.1. La presión durante el fenómeno de cavitación es muy inestable por las fluctuaciones producidas durante la formación y colapso de la cavidad. Sin embargo, se coincide que a partir de 41.036 elementos los cambios en los resultados no son significativos, por tanto, la malla “M2” muestra independencia también para presión.

Tabla 3.2. Independencia de malla presión P [Pa].

N° Elementos		18.845	41.036	56.770	61.949
Puntos	distancia (x)	M1	M2	M3	M4
1	0,010	467.232,000	464.862,000	464.438,000	464.411,000
2	0,248	456.596,000	454.330,000	453.912,000	453.870,000
3	0,285	203.735,000	201.423,000	201.085,000	201.043,000
4	0,290	94.704,400	92.363,201	91.991,500	91.974,700
5	0,307	4.694,010	4.454,280	4.445,621	4.443,571
6	0,333	2.400,532	2.371,201	2.366,620	2.365,980
7	0,350	2.386,231	2.359,630	2.361,131	2.356,921
8	0,370	5.666,110	2.397,191	3.563,890	2.383,980
9	0,405	2.404,700	4.818,690	4.372,901	4.866,300
10	0,820	2.421,112	2.395,711	2.351,6100	2.212,271

(Fuente: Propia)

Con los resultados mostrados en las Tablas 3.1. y 3.2 se concluye que, a partir de 41.036 elementos, la malla muestra independencia. Por tanto, si se trabaja con mallas más densas que “M2” no se tendrá cambios relevantes en los resultados, pero se aumenta el tiempo de simulación requiriendo mayor recurso computacional.

3.1.2. Residuales

En la Figura 3.2 se aprecia el valor de los residuales de las distintas variables de la simulación con respecto al número de iteraciones para la malla “M2”, obtenida en la sección anterior. Se puede observar una notable inestabilidad en las iteraciones comprendidas entre 250 y 2.000, correspondientes al intervalo de tiempo $0,500 e^{-3} \leq t \leq 3,000 e^{-3}$ s. Lo cual se debe a la agresividad del fenómeno ya que durante ese periodo se lleva a cabo el ciclo de cavitación. A partir de ese instante, los residuales de las distintas variables se ubican en el orden de 10^{-3} .

Esto muestra que existe menos diferencia de los resultados obtenidos con respecto al paso del tiempo y se explica por la presencia de una cavitación generalizada en toda la sección. La misma que se genera a partir de $t = 3,500 e^{-3}$ s. En el Anexo XI se muestran los residuales correspondientes a las mallas “M1”, “M3” y “M4”.

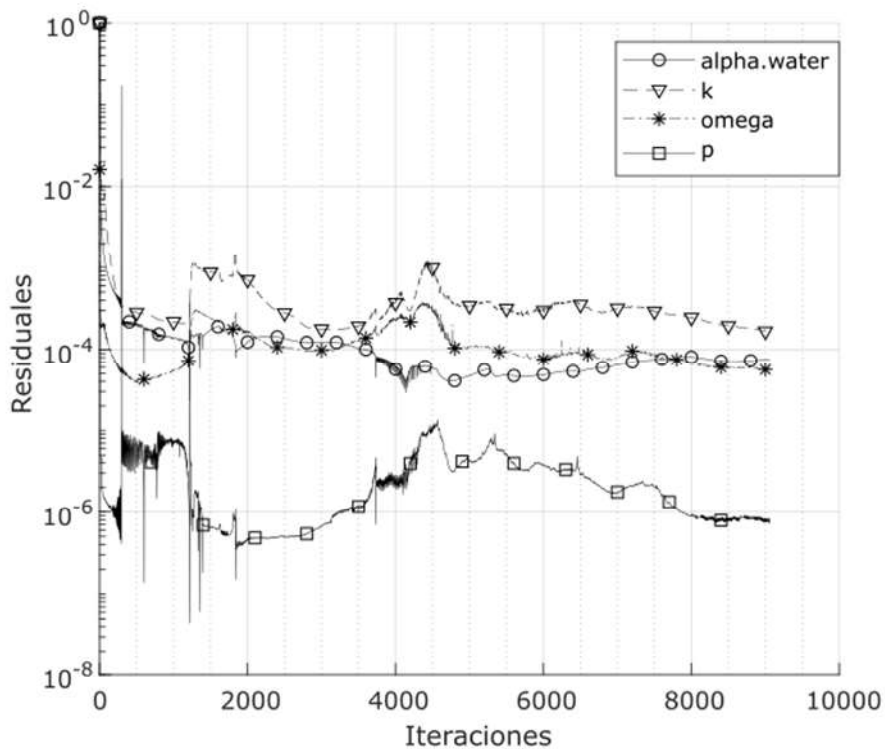


Figura 3. 2. Residuales de la malla “M2”.
(Fuente: Propia)

3.1.3. Parámetros del caso de estudio

Se obtuvieron los parámetros del criterio y^+ , número omega y el número de Courant, necesarios para evaluar la calidad malla. Los valores de cada uno se indica en la Tabla 3.3 los cuales se calcularon de acuerdo con las ecuaciones de la Tabla 2.3 mostrada en la sección 2.6.

Tabla 3.3. Números adimensionales para malla seleccionada.

Variable	Valor
Total de elementos	41.036,000
Total de nodos	83.330,000
Criterio y^+	7,380
Número omega	0,492
Número de Courant	0,166

(Fuente: Propia)

Para el criterio de y^+ es tomado un valor promedio de la zona de estudio y de acuerdo con el rango permisible indicado en la Tabla 2.3 se puede concluir que cumple con la calidad de malla. De la misma manera, se concluye que los valores obtenidos en el número de Courant y número omega cumplen con el criterio de calidad de malla.

3.1.4. Comparación gráfica con estudios previos

Los resultados cualitativos se presentan en una escala de grises y se lo hace en función de la fracción de volumen de agua, donde, el color blanco representa el agua líquida y el color negro representa la burbuja de vapor.

La simulación numérica se validó con los resultados experimentales y computacionales obtenidos en los estudios realizados por Dular et al. [34], tal como se muestra en la Figura 3.3. Se puede observar que el ciclo de cavitación se produjo bastante bien concordando con los estudios previos. Sin embargo, presentó ciertas diferencias, tales como el intervalo de tiempo en el cual se captó el fenómeno y la topología de la nube. Esto se debe a la aplicación del modelo de turbulencia. En los trabajos de Dular et al. se utilizó el modelo $k - \epsilon$ RNG, el cual se usa para estudio de flujo externo y con pequeños gradientes de presión. Para este trabajo se utilizó la implementación del modelo $k - \omega - SST$ SAS junto al modelo

de cavitación ZGB en *OpenFOAM*, el cual ayuda a capturar la separación del flujo y es apto para gradientes de presión adversos.

Se consideró un intervalo de tiempo $\Delta t = 9,000 e^{-6}$ s para lograr captar el fenómeno y un tiempo inicial de estudio $t_0 = 1,350 e^{-3}$ s. El desprendimiento de la nube cavitativa adjunta se produjo alrededor del tiempo $t = t_0 + 80\Delta t$ y su colapso en $t = t_0 + 175\Delta t$.

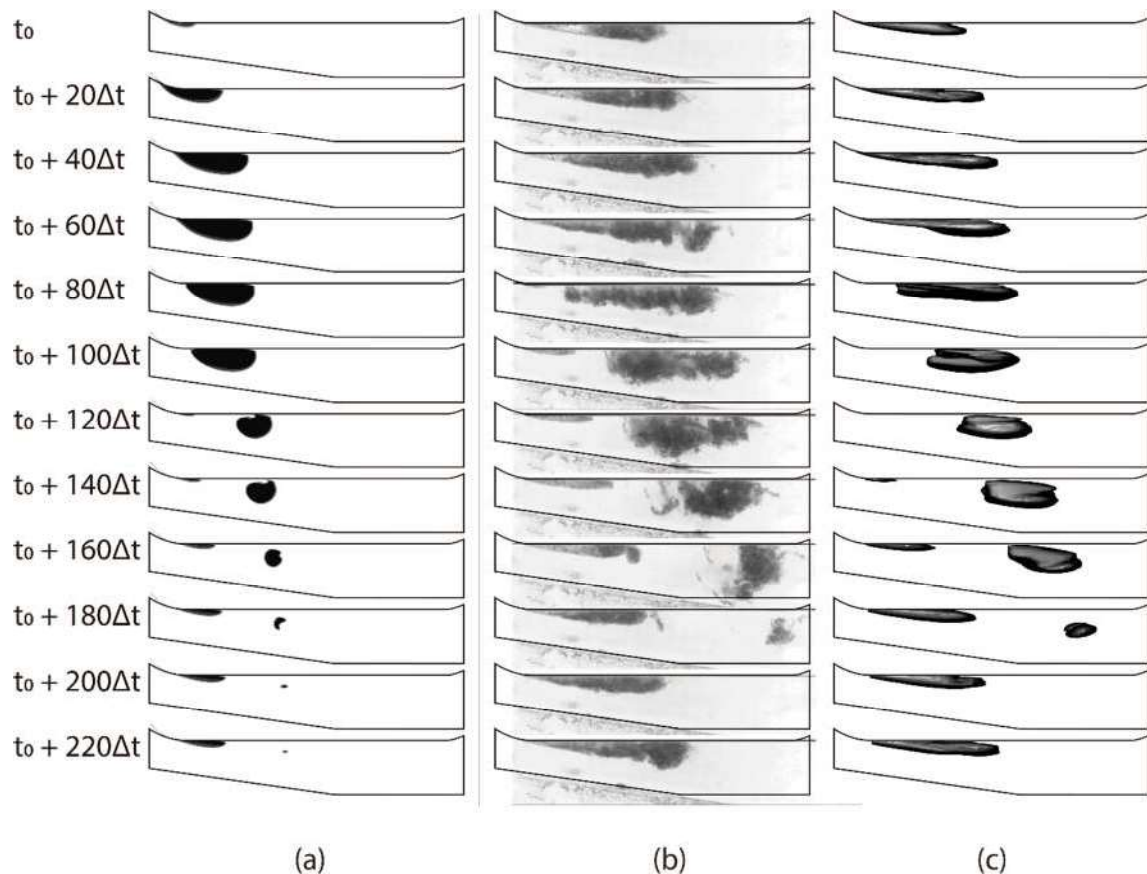


Figura 3. 3.Comparación gráfica de un ciclo de cavitación, a) resultados simulación numérica, b) observación experimental y c) simulación realizada por Dular et al. (Fuente: Propia)

De acuerdo con los estudios previos, la evolución de la estructura de cavitación se observó en $\Delta t = 1,600 e^{-4}$ s. Este intervalo representa el tiempo en el que se capturan las imágenes del estudio experimental y en el cual se registran los resultados de la simulación. Además, en su trabajo se puede apreciar que la cavidad adjunta se desprendió alrededor del tiempo $t = t_0 + 20\Delta t$ y su colapso aproximadamente en $t = t_0 + 45\Delta t$ para ambos casos [34].

3.1.5. Análisis de presiones absolutas

Para el análisis cuantitativo de la relación entre la evolución de la nube cavitativa y el daño inducido por la misma, se graficó la presión absoluta en función del tiempo en puntos característicos ubicados en la superficie. El punto "A" representa al desprendimiento de la

nube y está ubicado a 0,043 m del inicio de la contracción, el punto “B” representa su colapso y está ubicado a 0,074 m tal como se muestra en la Figura 3.4.

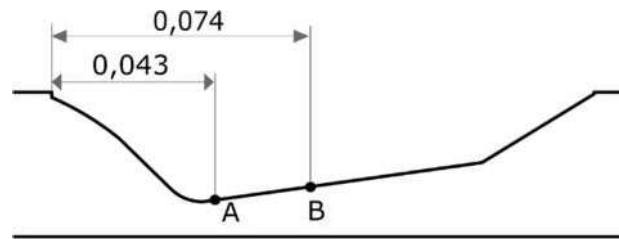


Figura 3. 4. Ubicación de puntos “A” y “B”.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.5 se muestran las fluctuaciones de presión en el punto “A”, donde se pudo apreciar claramente que al usar pequeños pasos de tiempo la simulación puede predecir el fenómeno de desprendimiento a mayor detalle [34]. Se puede observar que en el tiempo $t = 2,090 e^{-3}$ s se produjo un pico de presión de $P = 4,800 e^5$ Pa. Este incremento repentino de presión se produjo por el desprendimiento de la cavidad adjunta a la superficie. De manera continua, la presión vuelve a ser baja formándose la nueva cavidad.

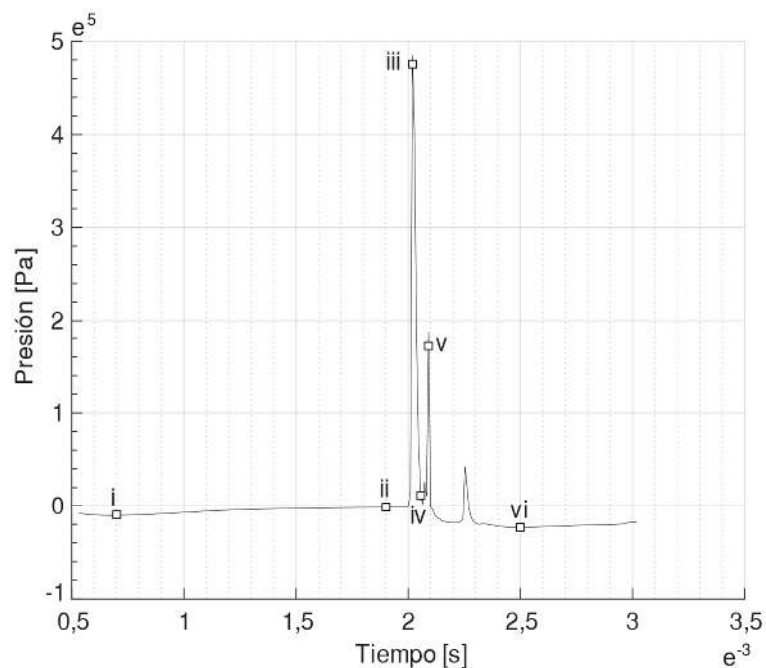


Figura 3. 5. Presión absoluta en el punto “A”.
(Fuente: Propia)

Se ubicaron seis instantes de tiempo para presentar con mayor detalle el comportamiento de la nube y cómo esta influye en los resultados de presión. Se tomó en cuenta una escala de grises para mostrar los campos de presión producidos en la cercanía de la nube cavitativa, como se puede apreciar en la Figura 3.6.

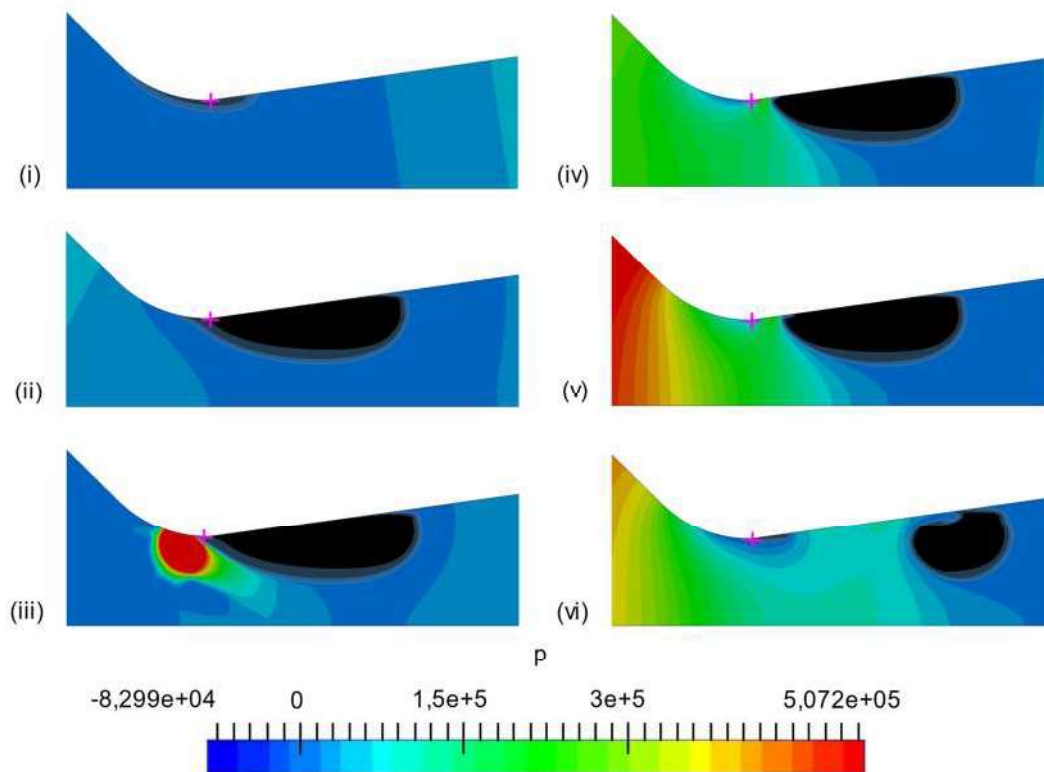


Figura 3. 6. Campo de presión de acuerdo con el desarrollo de la nube cavitativa de acuerdo con los instantes marcados en el punto "A".
(Fuente: Propia)

En el instante "i" se puede apreciar que la presión tiene un valor cercano a cero, esto se debe a la caída que sufre la misma cuando el flujo pasa por la contracción del tubo Venturi también llamada como borde de ataque. Se obtuvo una presión absoluta mucho más baja que la presión de vapor del agua, por tanto, se dio origen a la formación de la nube cavitativa. En el instante "ii" se puede apreciar el crecimiento de la nube justo antes de su desprendimiento. En el momento "iii" se produce el pico de presión local, el cual corresponde al instante del desprendimiento de la "cola" de la nube con la superficie del borde de ataque. Este gran incremento de presión explica la razón por la cual el daño provocado en la superficie, observada por Dular et al., ocurre también en momentos distintos a la nube de cavitación colapsando. Una vez desprendida, se observan las fluctuaciones de presión en los alrededores del punto de desprendimiento, y como su valor sigue siendo bajo junto a la nube de acuerdo con su avance con el movimiento del flujo. Además, en los instantes "iv", "v" y "vi" se aprecia nuevamente la formación y crecimiento de la nube adjunta en el punto "A".

En la Figura 3.7 se muestran las fluctuaciones de presión en el punto "B" correspondiente al colapso de la nube. Se puede observar que en el tiempo $t = 2,961 \cdot 10^{-3}$ s se produjo un alto pico de presión correspondiente a $P = 3,000 \cdot 10^7$ Pa.

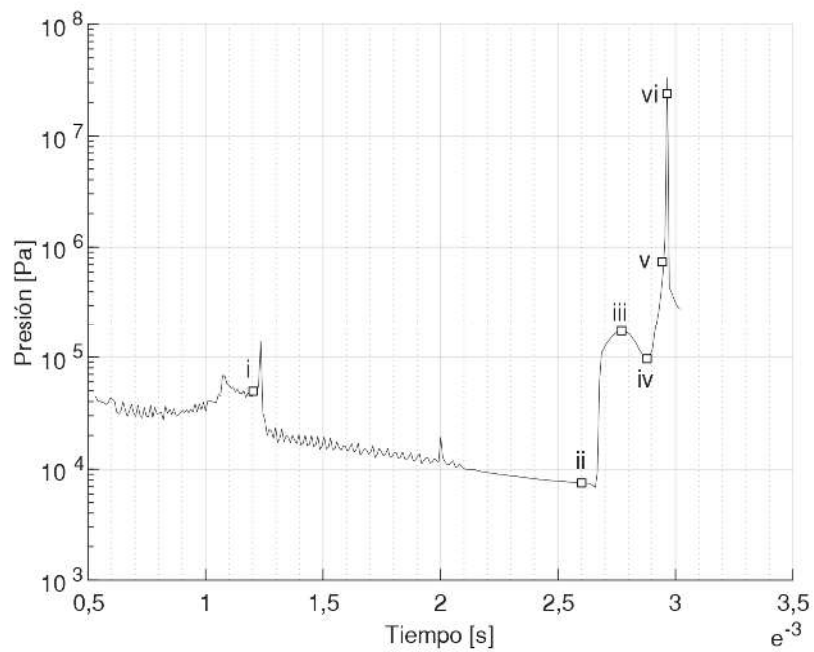


Figura 3. 7. Presión absoluta en el punto "B".
(Fuente: Propia)

De igual manera, se ubicaron seis instantes de tiempo para identificar de mejor manera el comportamiento de la nube con respecto a la presión, tal como se puede apreciar en la Figura 3.8.

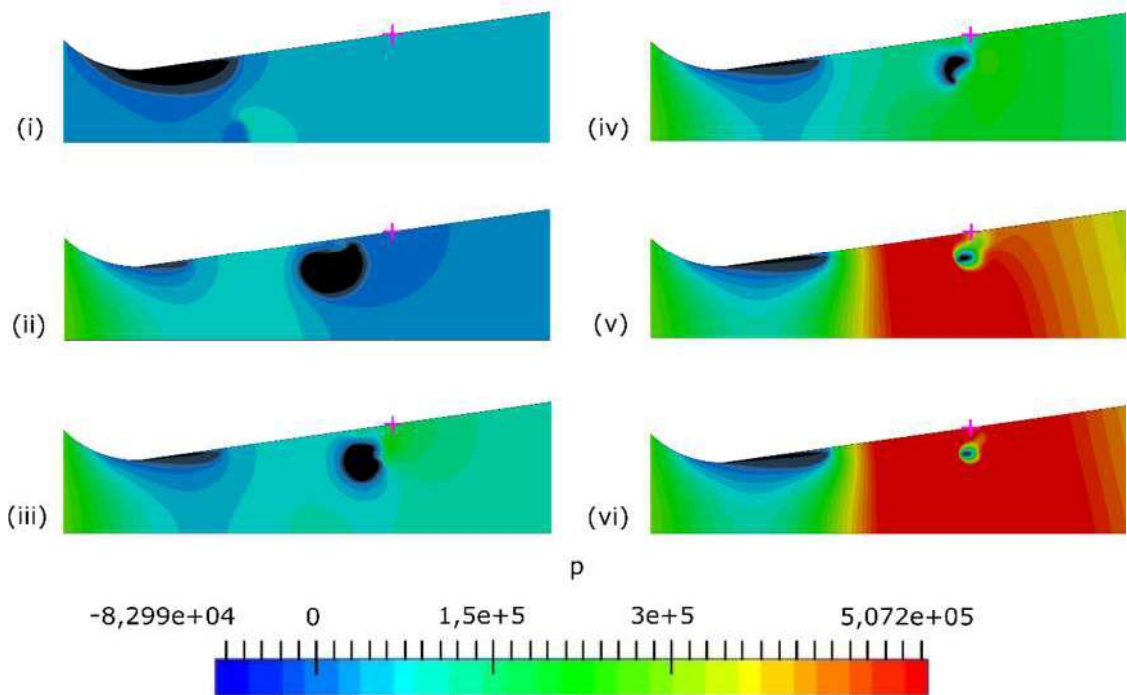


Figura 3. 8. Campo de presión de acuerdo con el desarrollo de la nube cavitativa en el punto B.
(Fuente: Propia)

En los instantes “i” y “ii” se puede apreciar que la presión tiende a disminuir de acuerdo con el desarrollo de la nube cavitativa cerca de la superficie. Llegó a alcanzar una presión mínima de $P = 7,000 e^3$ Pa correspondiente a $t = 2,606 e^{-3}$ s. A partir de este instante, se observa una pequeña inestabilidad de la presión en “iii”. Se observa como la presión incrementa de acuerdo con el alejamiento de la cavidad con la superficie. En el instante “iv” se aprecia el acercamiento de la nube a una zona de mayor presión y como se deforma a causa de chorro de reingreso direccionándola a la superficie. En “v” se puede apreciar el inicio del colapso de la nube, la presión se incrementa de acuerdo la onda de choque se acerca a la superficie. De manera seguida, se observa en “vi” el instante en el cual la presión es máxima debido al impacto de la onda de choque del colapso de la nube.

3.1.6. Formación de chorro de reingreso

El cambio de dirección de flujo cuando atraviesa una zona de mayor presión se llama chorro de reingreso, también conocido como “micro-jet”. Es el causante de la separación de la nube de cavitación de la superficie cuando este alcanza el borde de ataque. El modelo de cavitación de ZGB no es suficiente al simular las características del vórtice para el desprendimiento de la nube en una cavidad adjunta y separada [53]. Esto se puede evidenciar en la Figura 3.9 donde se muestran los vectores de velocidad durante el desprendimiento de la nube en $t = 2,016 e^{-3}$ s.

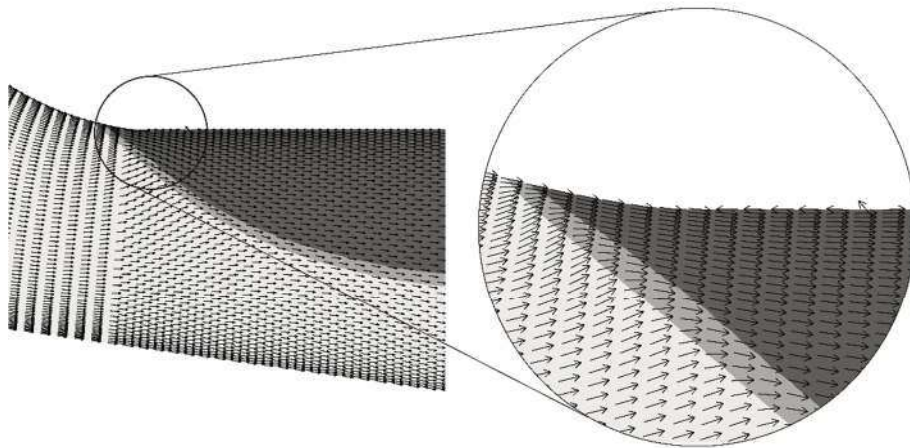


Figura 3. 9. Chorro de reingreso durante el desprendimiento de la nube.
(Fuente: Propia)

Como los resultados se muestran a partir de la simulación con el modelo de ZGB, se puede apreciar que la mezcla de vapor y agua en la “cola” de la cavidad se mueve hacia el borde de ataque del tubo Venturi. Bajo la acción de la alta presión local, se genera un pequeño vórtice con el chorro de reingreso. El vórtice se expande con el movimiento del flujo hacia

adelante desprendiéndose del borde de ataque para luego dirigirse aguas abajo separándose de la superficie.

El modelo de ZGB puede predecir la estructura de la cavidad adjunta con precisión, pero no la formación del chorro de reingreso que la separa de la superficie. Sin embargo, el modelo evidencia de forma correcta la acción de corte que provoca el chorro en la cavidad separada.

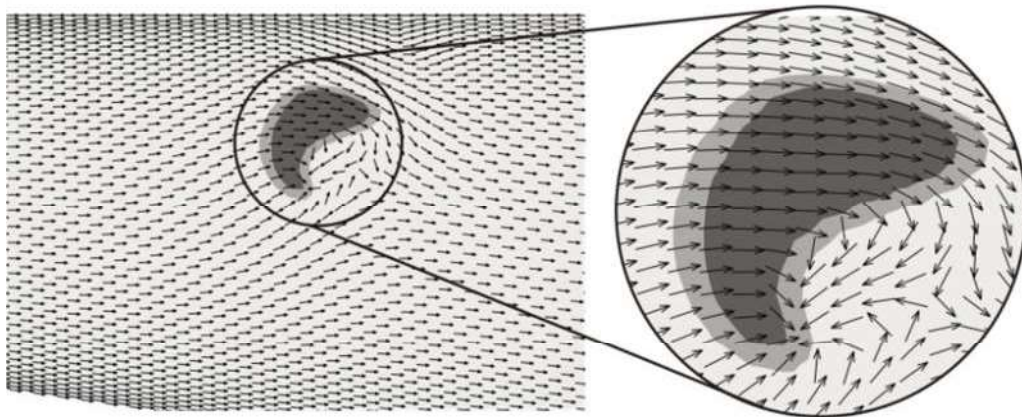


Figura 3. 10. Chorro de reingreso deformando la nube de cavitación.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.10 se muestran los vectores de velocidad en los alrededores de la cavidad separada justo antes del inicio del colapso de la nube, en el tiempo $t = 2,898 e^{-3}$ s. Se puede apreciar un aceleramiento del agua que rodea la nube hacia el interior de esta, en dirección contraria al flujo, formando una especie de hendidura. En el instante del colapso, el chorro que deforma la cavidad mantiene una dirección perpendicular a la superficie de la sección Venturi. El cual, provoca que el colapso de la nube no sea concéntrico en la zona cercana a la superficie [54]. El aumento de la presión se evidencia en la Figura 3.9 (instante "iv").

3.2. Simulación para el HFC

Los resultados mostrados a continuación son de dos casos de estudio. Los directorios fueron nombrados como "A" y "B" donde se encuentra la "malla 1" y "malla 2" respectivamente, los códigos de los casos se encuentran en el Anexo XII. Las simulaciones se corrieron en la estación de trabajo descrita en la sección 2.5, el tiempo promedio para cada simulación fue de 12 horas usando 12 procesadores en paralelo.

3.2.1. Independencia de malla

El estudio de independencia de malla fue realizado por Hidalgo V. en su tesis doctoral. Se obtuvo que a partir de los 532.968 elementos en adelante los resultados no sufren variaciones importantes [5]. Las mallas presentadas en los casos “A” y “B” para el HFC tienen 2’443.192 y 1’926.841 elementos respectivamente, por lo antes mencionado se establece que no se producirán errores inducidos por la malla durante la simulación. No se repitió el estudio de independencia de malla para ahorrar recursos computacionales y tiempo.

3.2.2. Calidad de malla

Los parámetros usados para evaluar la calidad de malla fueron el criterio y^+ y el análisis de distorsión hexaédrica. Los valores obtenidos de y^+ para la “malla 1” son de 2,830 en promedio, un valor mínimo de 0,820 y un máximo de 182,400; los valores de la “malla 2” son 2,580 en promedio, un máximo de 194,100 y un mínimo de 1,800. Los puntos máximos se dan en los cambios bruscos de la geometría en donde la discretización de malla no pudo formar celdas uniformes. Los valores se encuentran dentro del rango establecido en la sección 2.6, por lo que se cumple con el criterio de y^+ .

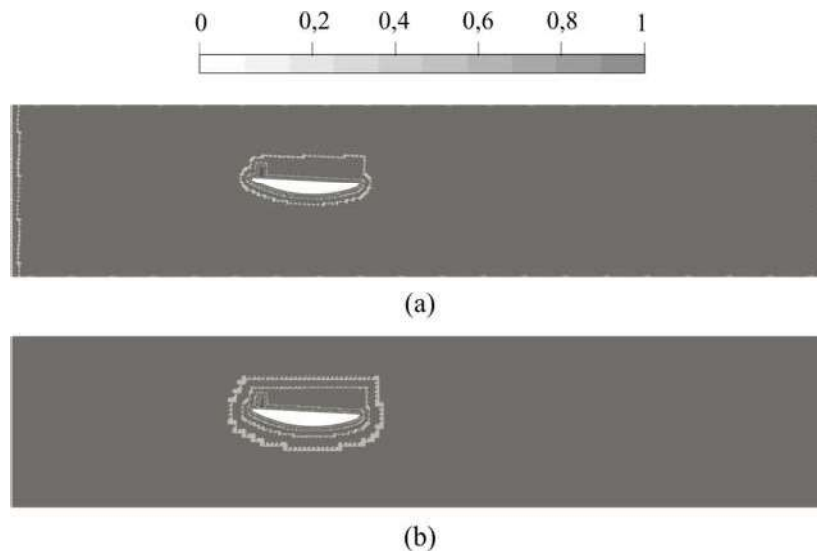


Figura 3. 11. Análisis de distorsión hexaédrica, a) resultados “malla 1” y b) resultados “malla 2”.
(Fuente: propia)

La distorsión hexaédrica se analizó con el software *ParaView* y su filtro *Mesh Quality*. La Figura 3.11 muestra los resultados de la distorsión para cada malla. Existe sectores liderados por valores de 1, en ambos casos el rango aceptable se encuentra entre 0,5 y 1, el rango normal va de 0 a 1 [55]. Los pequeños sectores con valores fuera de rango se generan por la deformación de celdas entre niveles y son inevitables debido al tipo de malla

empleada. Las dos mallas cumplieron con el criterio de y^+ y el análisis de distorsión hexaédrica, por lo que se concluye que poseen una buena calidad.

3.2.3. Residuales

La Figura 3.12 muestra los residuales de las variables $alpha.water$, k , $omega$ y p_rgh función del número de iteraciones para el caso "A" y "B". La escala para el número iteraciones es normal y su rango va de 0 a 12.000, en el caso de residuales se cambió a escala logarítmica por tener una escala de valores más bajos. El rango para los residuales se encuentra entre 10^{-3} y 10^{-7} .

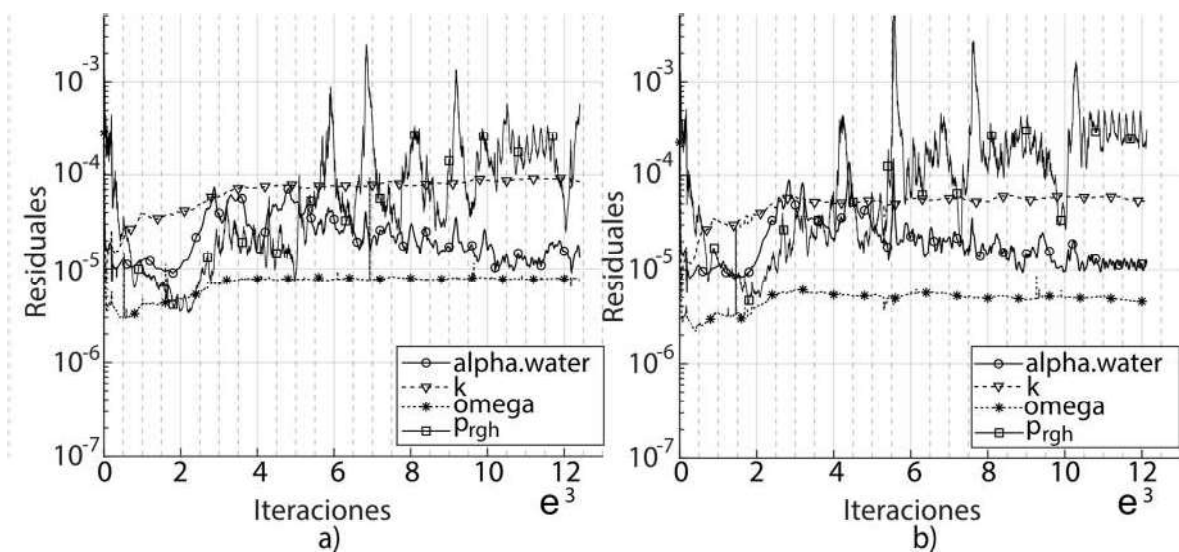


Figura 3. 12. Grafica de residuales en función del número de iteraciones, a) residuales caso "A" y b) residuales caso "B".
(Fuente: Propia)

Debido al comportamiento agresivo e inestable del fenómeno, se observa un comportamiento muy fluctuante para las variables $alpha.water$ y Presión p_rgh . Los residuales de la tasa específica de disipación turbulenta y la energía cinética turbulenta presentan estabilidad a partir de la iteración 4.000 y 10.000 respectivamente para el caso "A". Para el caso "B", k y ω no se estabilizan, pero su rango de residuales es menor que en el caso anterior. Las primeras iteraciones en todos los casos inician con gran irregularidad hasta disminuir el error en sus soluciones. La presión y la fracción de vapor son las variables que nunca llegan a presentar una tendencia, pero se mantienen en un rango comprendido en el orden de 10^{-3} a 10^{-5} .

3.2.4. Números adimensionales

Los números adimensionales presentados en las secciones 1.5 y 2.6 en la Tabla 1.3 y 2.3, se calculó para los dos casos de estudio. El número de Reynolds y de cavitación es el mismo para ambos casos su valor es $3'175.771,457$ y uno respectivamente. El valor del número de Reynolds permitió predecir el tipo de flujo en el que estamos trabajando en este caso es turbulento, el número de cavitación es un dato así que solo se verificó y su valor es 1. Los cálculos se encuentran en el Anexo IX.

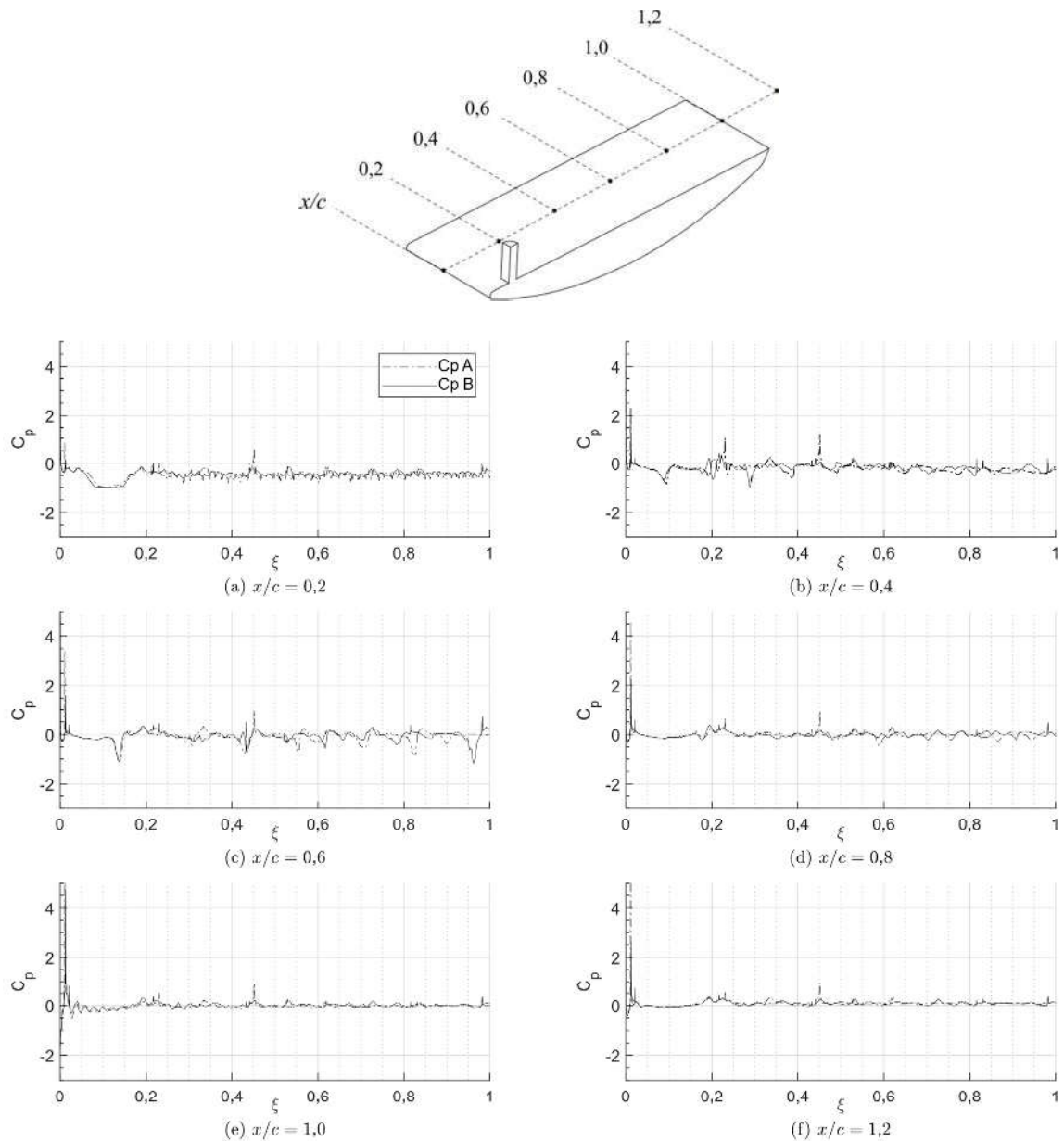


Figura 3. 13. Gráficas del coeficiente de presión en función del tiempo adimensional de los casos "A" y "B".
(Fuente: Propia)

La figura 3.13 no posee una imagen en estudios previos con la cual se compare, se la realizó con el propósito de observar el comportamiento de las presiones sobre la superficie plana del HFC en puntos específicos. Los puntos se colocaron a 13,665 mm del borde del HFC entre las caras “front” y “back” a lo largo de la superficie plana del hidroálabe y uno fuera de ella.

El coeficiente de presión se ha calculado usando el software *ParaView* para 6 puntos ubicados en el centro de la superficie plana del HFC como se indica en la Figura 3.13. Se asigna los nombres $C_p A$ y $C_p B$ para identificar los casos “A” y “B” respectivamente. Los resultados observados muestran un comportamiento similar entre las dos mallas, la vibración se relaciona con la región en la que colapsan las nubes de cavitación. Los incrementos de C_p o picos positivos se refieren a las zonas de alta presión y desprendimiento de la cavitación, los picos negativos son la ausencia de desprendimiento o formación de las cavidades. Un $C_p = 0$ nos dice que la presión de referencia es igual a la presión p_∞ y no está generando ningún fenómeno. Los puntos 0,2c, 0,4c y 0,6c son los que muestran mayores variaciones en el tiempo, a medida que los puntos se alejan del obstáculo semicircular las variaciones se atenúan y son cercanas a cero.

3.2.5. Comparación gráfica con estudios previos

La comparación se realizó en base a los resultados presentados en la tesis doctoral de Hidalgo V [5]. En la cual se muestra diez imágenes, cinco de la vorticidad en los alrededores del obstáculo semicircular del HFC con un valor de Q-criterio de $Q = 1 e^{-7} s^{-2}$ y cinco de la cavidad residual con un valor de fracción de vapor de $\alpha = 0,1$. El estudio realizó una simulación de cavitación y erosión, siendo comprobadas con los estudios experimentales realizados sobre el HFC por Escaler X [41].

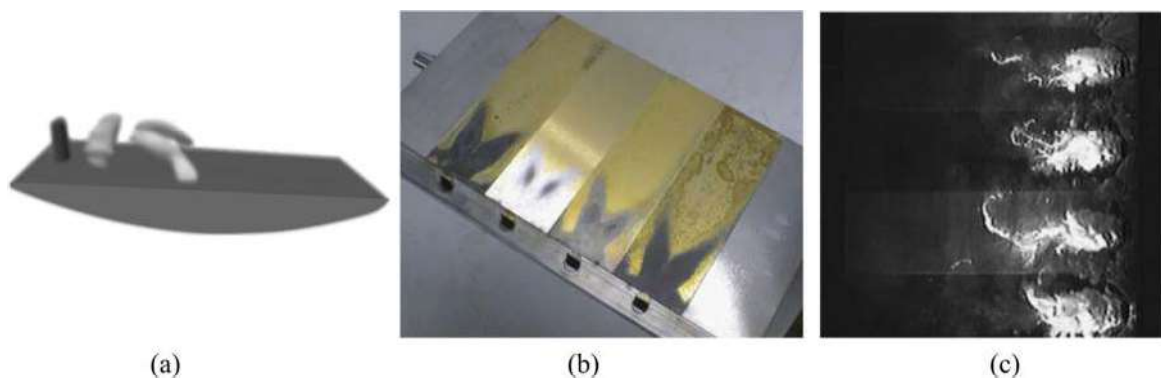


Figura 3. 14. Imágenes para ubicar el punto de partida del estudio, a) cavidad separada en forma de brazos, b) pruebas experimentales del HFC (daños en la superficie, orejas de conejo) y c) nubes de cavitación sobre el HFC obtenidas experimentalmente.

(Fuente: [5], [56])

Tomando en cuenta los estudios antes mencionados nos centramos en ubicar un punto de partida para la comparación. Con la ayuda de imágenes obtenidas en el post proceso de resultados buscamos una cavidad separada en forma de dos brazos alargados los cuales causan daño en la superficie del material dejando su huella característica descrita como orejas de conejo. Ver Figura 3.14 (a) y (b). El estudio experimental nos da a conocer una imagen de la cavidad adjunta tal como se aprecia en la Figura 3.14 (c), esta no se analizó en el estudio de Hidalgo V. solo se analizó la cavitación separada. La Tabla 3. 4 muestra los tiempos en los que fue localizada la imagen en forma de brazos en para cada uno de los casos.

Tabla 3. 4. Tiempos en los que se identifica la cavidad.

Caso	Tiempo [s]
A	$5,050 e^{-3}$
B	$4,820 e^{-3}$

(Fuente: Propia)

Una vez se localizó el punto de partida, con la ayuda de la gráfica $V_{cav}/V_{cav,max}$ mostrada en la Figura 3.15 se analizó y encontró los demás instantes del ciclo de cavidad adjunta los cuales se detallan en la Tabla 3.5. Para la gráfica se tuvo que obtener el volumen total de la geometría presentada en la sección 2.3.2 y restar de ella el volumen de agua calculado por la función *waterVolume* en todos los tiempos, con esto se obtiene el volumen de vapor y se divide para su valor máximo.

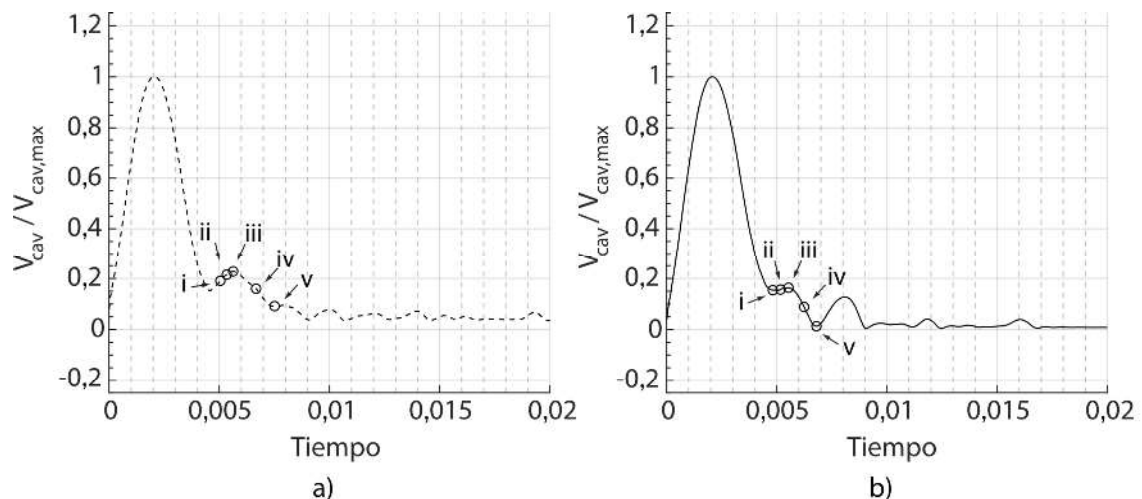


Figura 3. 15. Gráfica de volumen total de vapor, a) gráfica del caso "A" y b) gráfica del caso "B".
(Fuente: Propia)

El caso "A" posee valores de fracción de vapor más grandes que el caso "B", los tres primeros puntos "i", "ii" e "iii" en los dos casos de estudio se encuentran cercanos entre sí y ocurren en un corto período de tiempo. Para el caso de los dos últimos puntos el tiempo

que transcurre para su aparición es más largo y los deltas de fracción de vapor son más grandes entre ellos.

Tabla 3. 5. Tiempo y fracción de vapor para el ciclo de cavitación separada.

Momento	Tiempo Caso A [s]	Fracción de volumen, Caso A	Tiempo Caso B [s]	Fracción de volumen, Caso B
i	$5,050 \text{ e}^{-3}$	$1,909 \text{ e}^{-1}$	$4,820 \text{ e}^{-3}$	$1,540 \text{ e}^{-1}$
ii	$5,340 \text{ e}^{-3}$	$2,154 \text{ e}^{-1}$	$5,170 \text{ e}^{-3}$	$1,563 \text{ e}^{-1}$
iii	$5,630 \text{ e}^{-3}$	$2,276 \text{ e}^{-1}$	$5,530 \text{ e}^{-3}$	$1,637 \text{ e}^{-1}$
iv	$6,670 \text{ e}^{-3}$	$1,599 \text{ e}^{-1}$	$6,240 \text{ e}^{-3}$	$8,826 \text{ e}^{-2}$
v	$7,510 \text{ e}^{-3}$	$9,150 \text{ e}^{-2}$	$6,800 \text{ e}^{-3}$	$1,312 \text{ e}^{-2}$

(Fuente: Propia)

Los cinco momentos identificados para el ciclo de cavitación separada son “i”, “ii”, “iii”, “iv” y “v”. Los puntos describen la identificación de la cavidad y su crecimiento, el punto máximo en el ciclo, la disminución del volumen de vapor y el punto más bajo en donde el volumen de vapor colapsa.

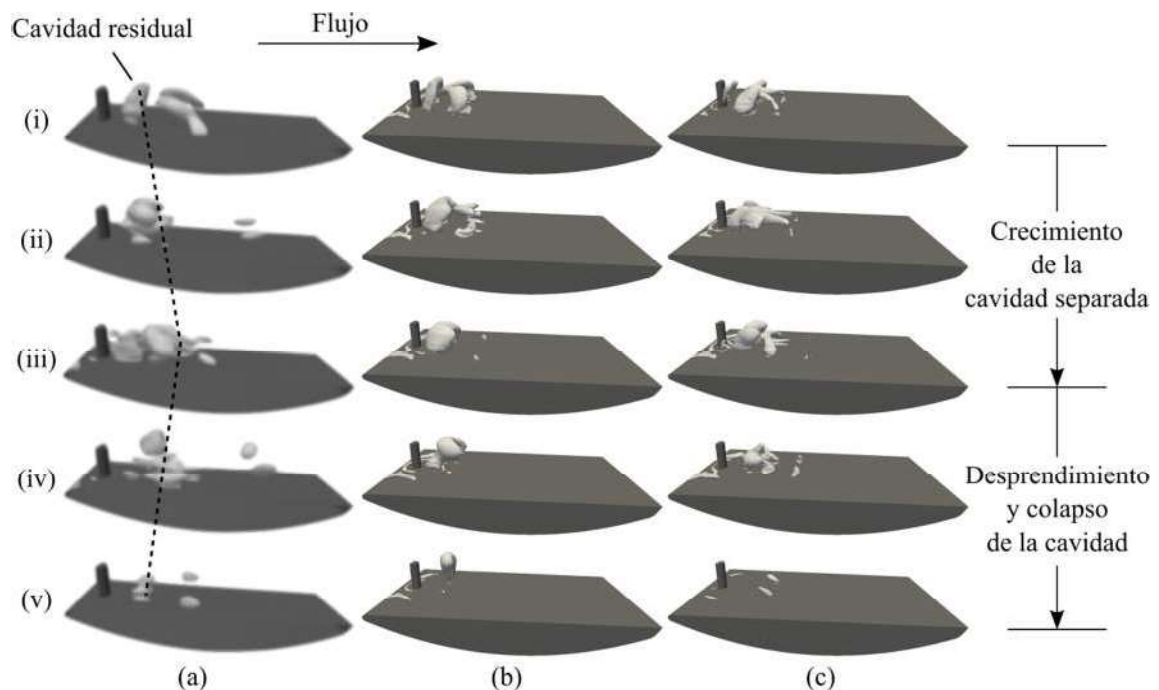


Figura 3. 16. Comparación del ciclo evolutivo de la cavidad separada, a) imágenes de estudios previos, b) resultados del caso "A" y c) resultados del caso "B".

(Fuente: Propia)

La Figura 3.16 muestra que la cavidad de vapor en forma de brazos es más corta a lo largo de la superficie del HFC para los dos casos. Esto se debe al cambio de modelo de turbulencia, se pasó de un modelo ILES a un modelo RANS. El primer modelo genera

mayor turbulencia por lo que las cavidades en los cinco momentos no se asemejan a los estudios previos, pero siguen el comportamiento del ciclo.

La Figura 3.17 muestra la comparación de los resultados de vorticidad, durante el crecimiento, desprendimiento y colapso de la cavidad en los tres casos. Se usó el software *ParaView* con un valor de $Q = 1 \text{ e}^{-7} \text{ s}^{-2}$. La imagen muestra los cinco puntos identificados en el análisis de la cavidad de vapor separada. Se observa que las imágenes de estudios previos poseen un nivel de vorticidad más alto, las nubes cubren por completo la superficie plana del HFC y el obstáculo semicircular. En los casos “A” y “B” las nubes de vorticidad cubren por completo al obstáculo y muestran grandes áreas descubiertas en la superficie plana posterior del HFC. El desprendimiento es bajo y casi nulo en “A” y “B”.

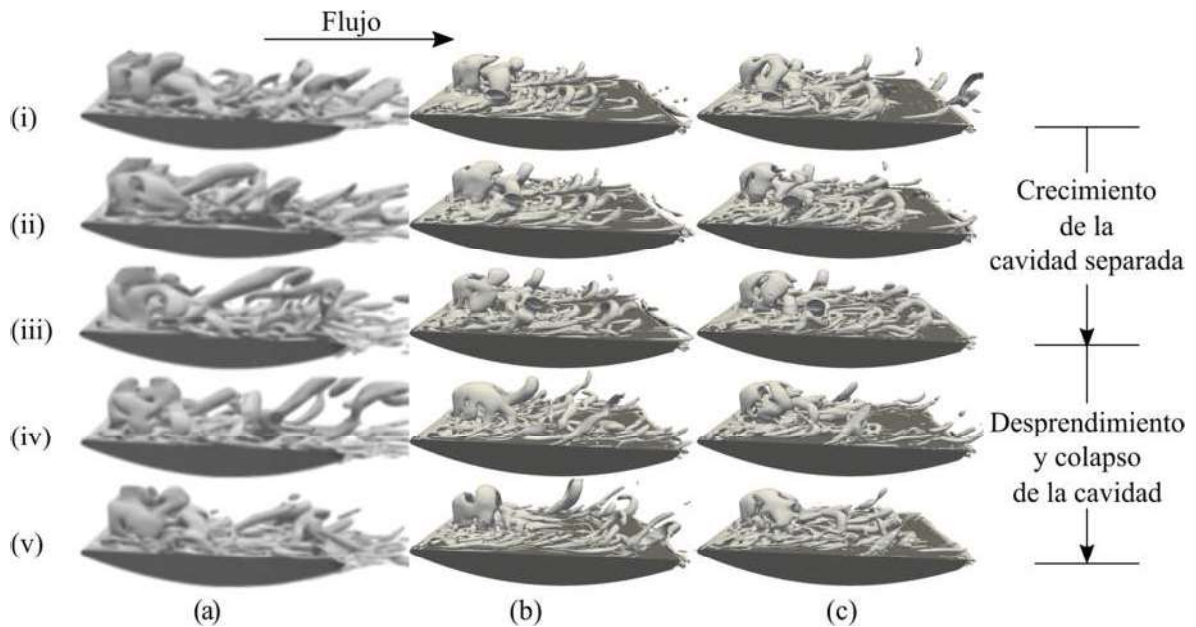


Figura 3. 17. Vorticidad según Q criterio de la cavidad separada, a) imágenes de estudios previos, b) resultados del caso “A” y c) resultados del caso “B”.
(Fuente: Propia)

El análisis de la cavitación adjunta se hace con la ayuda de la gráfica $V_{cav}/V_{cav, max}$, al igual que se realizó con la cavidad separada. Se identificó cinco puntos en el tiempo (“vi”, “vii”, “viii”, “ix” y “x”) los cuales se muestran en la Figura 3.18. Representan la formación de la cavidad adjunta en los alrededores del obstáculo semicircular y el crecimiento de la cavidad en el borde de ataque, el inicio de su desprendimiento causado por el chorro de reingreso, el punto más alto en el ciclo y la disminución del volumen de vapor.

Los casos “A” y “B” muestran que el comportamiento de “vi” al “viii” poseen una desviación del 1,435% en los datos. Para los datos que se encuentran entre los puntos “viii” y “x” el porcentaje de desviación es del 3,170%.

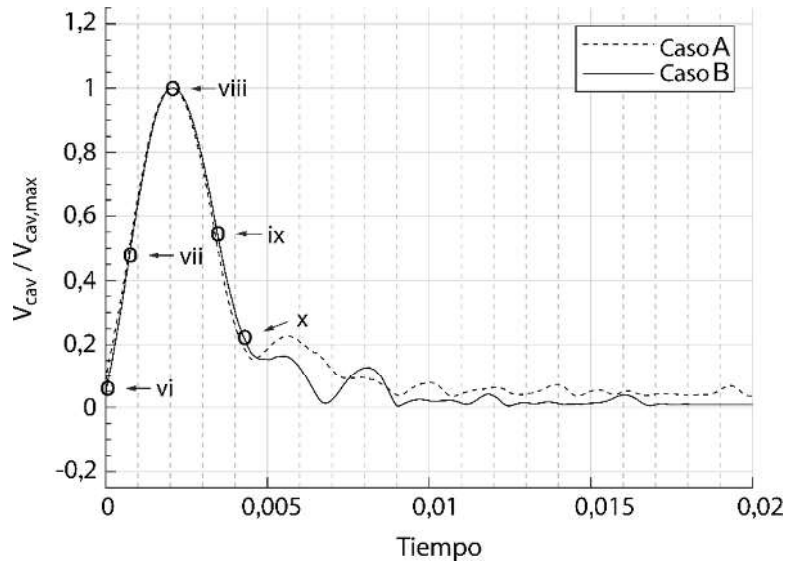


Figura 3. 18. Gráfica de volumen total de vapor para el caso "A" y "B".
(Fuente: Propia)

Los tiempos y los valores de fracción de vapor para los puntos de cavitación adjunta se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Tiempo y fracción de vapor para el ciclo de cavitación adjunta.

Momento	Tiempo Caso A [s]	Fracción de volumen, Caso A	Tiempo Caso B [s]	Fracción de volumen, Caso B
vi	$3,000 \text{ e}^{-5}$	$1,052 \text{ e}^{-1}$	$1,000 \text{ e}^{-4}$	$1,010 \text{ e}^{-1}$
vii	$7,400 \text{ e}^{-4}$	$5,050 \text{ e}^{-1}$	$7,800 \text{ e}^{-4}$	$5,058 \text{ e}^{-1}$
viii	$2,060 \text{ e}^{-3}$	1,000	$2,090 \text{ e}^{-3}$	1,000
ix	$3,460 \text{ e}^{-3}$	$5,036 \text{ e}^{-1}$	$3,540 \text{ e}^{-3}$	$5,037 \text{ e}^{-1}$
x	$4,280 \text{ e}^{-3}$	$1,902 \text{ e}^{-1}$	$4,410 \text{ e}^{-3}$	$1,918 \text{ e}^{-1}$

(Fuente: Propia)

La Figura 3.19 muestra la evolución de la cavidad adjunta en los casos "A" y "B", se puede observar que las imágenes son similares en los puntos "vii", "viii" y "ix". Sin embargo, las imágenes en los puntos "i" y "x" no coinciden por la pequeña desviación en los datos obtenidos. El comportamiento después del punto "x" para el caso "A" como se lo detalla en la Figura 3,18 posee valores de fracción de vapor mayores al caso "B". Esto significa que la "malla 1" reproduce mejor el fenómeno.

La Figura 3.20 muestran la evolución de la vorticidad en la cavitación adjunta. Se puede apreciar que el punto "ix" es el único que se asemeja en ambos casos, las demás imágenes poseen rasgos pero en menor medida.

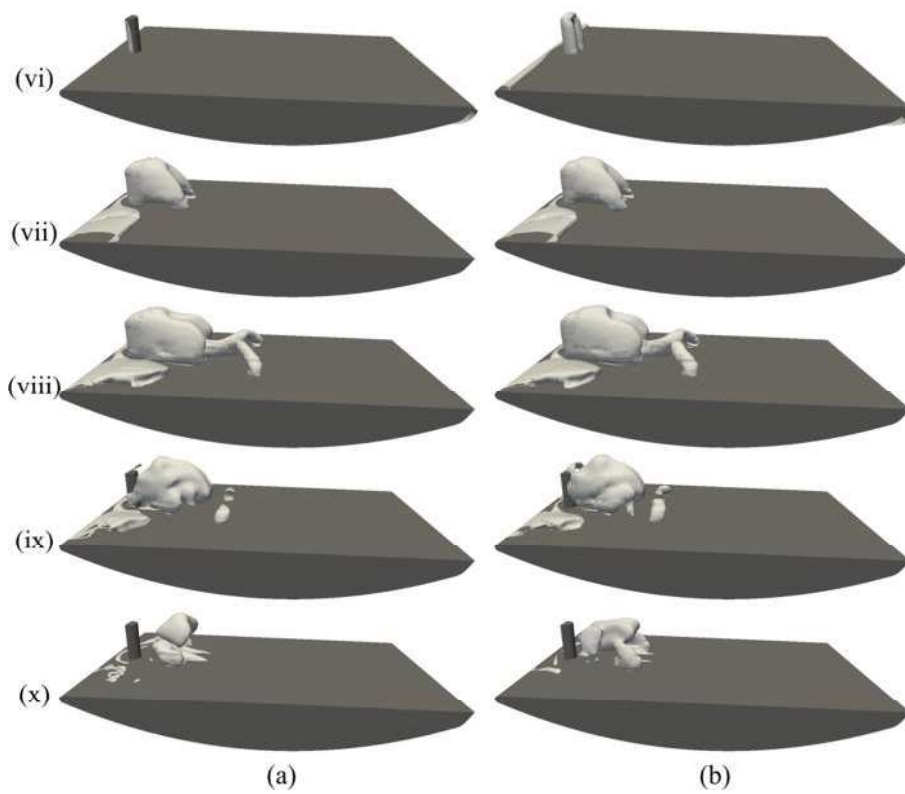


Figura 3. 19. Evolución de la cavidad adjunta, a) resultados caso "A" y b) resultados caso "B".
(Fuente: Propia)

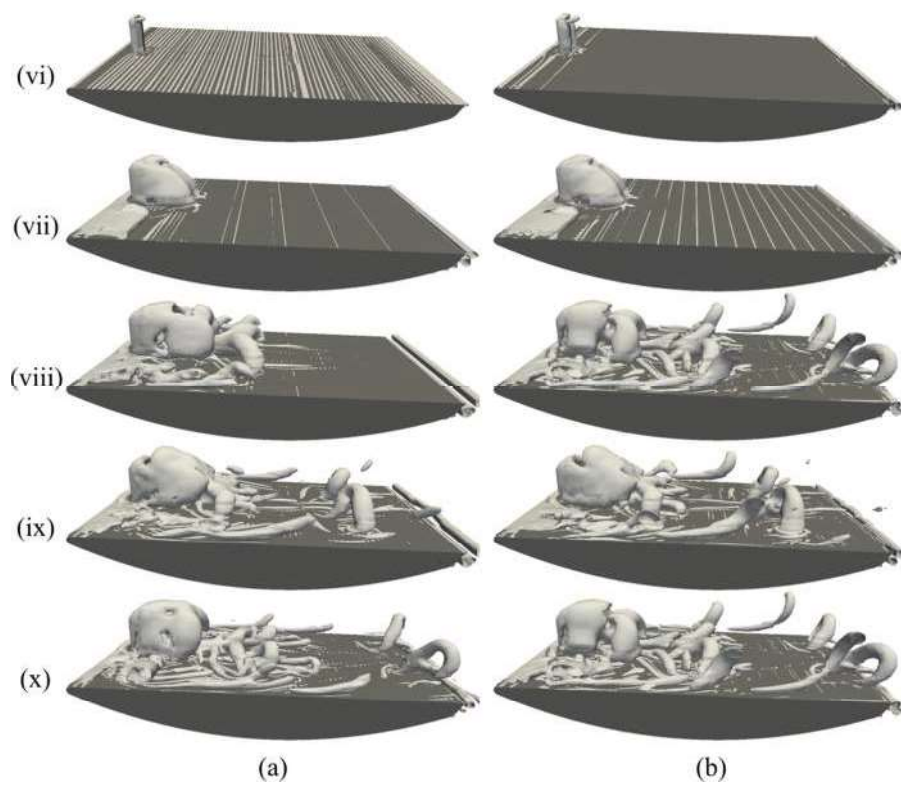


Figura 3. 20. Vorticidad de la cavidad adjunta, a) resultados caso "A" y b) resultados caso "B".
(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Conclusiones

Fue posible realizar el estudio numérico del flujo cavitativo alrededor de una sección tipo Venturi y de un hidroálabe plano convexo con obstáculo semicircular, mediante la aproximación RANS y el algoritmo PIMPLE, usando el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST SAS y la implementación del modelo de Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) en el software libre *OpenFOAM* propuesta por Hidalgo V.

Se comprobó la confiabilidad de dicha implementación mediante la comparación visual de los resultados de ambas geometrías. Para la investigación del flujo cavitativo turbulento considerado como isotérmico, compresible e inestable con suposición de mezcla homogénea, inclusive con la utilización del modelo RANS.

Se desarrolló los modelos geométricos para cada caso mediante el uso de herramientas CAD. Con el modelo bidimensional del tubo Venturi se obtuvo los puntos necesarios para la generación de malla y en el caso del HFC se obtuvo un modelo sólido tridimensional.

Se generaron tres mallas, una estructurada para el caso Venturi y dos mallas híbridas para el caso del HFC. Con el uso de *Gmsh* y *SnappyHexMesh* respectivamente.

Se logró concluir que el uso del modelo de turbulencia $k-\omega$ SST SAS permite captar el ciclo de cavitación en el tubo Venturi en pasos de tiempo de $9e^{-6}$ s. Siendo más grande con respecto a los usados por Dular et al. correspondiente a $1e^{-4}$ s, tanto en la simulación numérica con el modelo $k-\epsilon$ como en la visualización experimental.

Se consiguió simular y describir la formación, crecimiento, desprendimiento e implosión de la nube de cavitación en el modelo 2D del tubo Venturi llegando a reproducir el chorro de reingreso durante el colapso y las fluctuaciones en el campo de presión circundante.

Se logró corroborar los picos de presión en la sección Venturi planteados por Dular et al., obteniendo una presión elevada emitida durante el colapso de la nube correspondiente a $3 e^7$ Pa y una menor de $4,8 e^5$ Pa durante el desprendimiento. De igual manera, se puede atribuir al colapso de la nube de cavitación el principal daño que puede producirse en la superficie y más aún debido a la topología que esta presenta debido a la formación del chorro de reingreso.

Se concluye que el modelo ZGB predice muy bien el colapso asimétrico de la nube cavitativa en el caso Venturi, pero presenta dificultades para interpretar correctamente el desprendimiento.

Se logró identificar la cavidad separada en forma de brazos en los dos casos de estudio del HFC, las cavidades en comparación con los estudios previos son más pequeñas debido al cambio de modelo de turbulencia.

Se concluye que la disposición del mallado si influye al momento de simular los casos del HFC. Se obtuvo mejores resultados al colocar la orientación de las líneas de la malla de forma paralela y perpendicular a la superficie de la del obstáculo semicircular. Mientras mejor se acopla la malla al obstáculo mejores resultados se obtiene.

Se determinó que las dos mallas híbridas utilizadas en los casos de estudio del HFC, lograron reproducir de manera similar la evolución de la cavitación adjunta. Sin embargo, para la evolución de la cavitación separada, la malla 1 del caso A fue la que mejor reprodujo el fenómeno.

4.2. Trabajos futuros

Tras haber definido las condiciones necesarias para llevar a cabo la simulación numérica de cavitación inestable alrededor de un tubo Venturi bajo un análisis bidimensional, es necesario realizar un estudio para un caso tridimensional del mismo usando mallas híbridas. Con el objetivo de analizar el comportamiento de la cavidad, especialmente en el instante del colapso, en el cual, se puede presentar mayor daño en la superficie.

Una vez que se ha estudiado y comprendido el fenómeno de cavitación inestable alrededor del HFC, queda aún por demostrar si realmente las cavidades que se generaron en el ciclo pueden llegar a dañar la superficie del material. En trabajos futuros se espera poder incorporar un modelo de erosión y comparar los resultados con lo obtenido experimentalmente.

A partir de este proyecto, se puede desarrollar un estudio comparativo entre los resultados de la simulación con RANS, otra desarrollada con el modelo ILES bajo las mismas condiciones y las observaciones experimentales. De esta manera obtener resultados que definan la mejor metodología para captar este tipo de fenómeno en tuberías con un brusco cambio de sección, como es el caso de un tubo Venturi.

Se puede presentar un estudio del efecto erosivo de la cavitación bajo los resultados presentados en este trabajo de titulación, tanto para el caso Venturi como para el HFC.

Referencias Bibliográficas

- [1] X. L. Victor H- Hidalgo, "Benefits of hydropower research in Ecuador using OpenFOAM based on CFD technology (A practical cavitation study for NACA0015)," no. MAY, pp. 123–127, 2014.
- [2] A. Peñaherrera, *Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano. Agencia de Regulación y Control de Electricidad*. 2016.
- [3] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, *Plan Nacional de Ciencia Energética 2016-2035*. 2016.
- [4] J. Kozak, P. Rudolf, M. Hudec, D. Stefan, and M. Forman, "Numerical and experimental investigation of the cavitating flow within Venturi tube," *J. Fluids Eng.*, vol. 141, no. April, 2018.
- [5] V. Hidalgo, "Numerical study on unsteady cavitating flow and erosion based on homogeneous mixture assumption," no. May, 2016.
- [6] "Proyecciones Poblacionales |." [Online]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>. [Accessed: 09-Nov-2019].
- [7] "Cobertura Anual del Servicio – ARCONEL." [Online]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/produccion-anual-2/>. [Accessed: 17-Nov-2019].
- [8] "Balance Nacional de Energía Eléctrica – ARCONEL." [Online]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>. [Accessed: 26-Oct-2019].
- [9] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, and M. Coussirat, "Detection of cavitation in hydraulic turbines," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, no. 4, pp. 983–1007, 2006.
- [10] J. Macas, "Estudio y simulación numérica de la cavitación inducida por los álabes directores de una turbina francis con características similares a las de la central hidroeléctrica san francisco," 2017.
- [11] J. Baquero, "Implicit Large Eddy simulation for unsteady cavitating flow around hydrofoils using OpenFoam software," Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [12] A. Marchegiani, "Cavitacion," *Univ. Nac. del Comahue*, vol. 1, p. 27, 2006.
- [13] A. Gupta, S. Dhuri, D. Chouhan, S. Raskar, and Y. R. Ingole, "Effects of Cavitation in Hydraulic Machines," vol. 6, no. 2, pp. 606–609, 2018.
- [14] Y. Çengel and J. Cimbala, *Mecánica de Fluidos 1ra Edicion Cengel, Editorial McGraw Hill Interameicana.*, vol. 1. .
- [15] K. Guachamín and A. Simbaña, "Estudio experimental del flujo rasante, con la implementación de estructuras adicionales sobre el perfil escalonado para

- incrementar la disipación continua de energía.,” Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [16] V. Hidalgo, X. Luo, B. Ji, and A. Aguinaga, “Numerical study of unsteady cavitation on 2D NACA0015 hydrofoil using free/open source software,” *Chinese Sci. Bull.*, vol. 59, no. 26, pp. 3276–3282, 2014.
- [17] L. Li, C. F. Lange, and Y. Ma, “Artificial intelligence aided CFD analysis regime validation and selection in feature-based cyclic CAD/CFD interaction process,” *Comput. Aided. Des. Appl.*, vol. 15, no. 5, pp. 643–652, 2018.
- [18] C. Hirsch, *Numerical Computation of Internal and External flows, Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, vol. 1. 2007.
- [19] L. Li, C. F. Lange, Z. Xu, P. Jiang, and Y. Ma, “Feature-based intelligent system for steam simulation using computational fluid dynamics,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 38, no. January 2019, pp. 357–369, 2018.
- [20] P. Pritchard and J. Leylegian, *Fox and McDonald’s Introduction to fluid mechanics*. 2011.
- [21] C. Poveda and S. Simbaña, “Estudio numérico y experimental de caudales óptimos para secado de grano de cacao.,” 2018.
- [22] D. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Indust. 2006.
- [23] “Modelos K-epsilon - CFD-Wiki, la referencia gratuita de CFD.” [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [24] “Modelos K-omega - CFD-Wiki, la referencia gratuita de CFD.” [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/K-omega_models. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [25] “Wilcox k-omega Model.” [Online]. Available: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/wilcox.html>. [Accessed: 03-Nov-2019].
- [26] “Modelo SST k-omega - CFD-Wiki, la referencia gratuita de CFD.” [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [27] “OpenFOAM: User Guide: k-omega Shear Stress Transport (SST).” [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>. [Accessed: 04-Nov-2019].
- [28] L. Davidson, “Evaluation of the Sst-Sas Model : Channel Flow , Asymmetric Diffuser and Axi-Symmetric,” pp. 1–20, 2006.
- [29] V. Hidalgo *et al.*, “Scale-Adaptive Simulation of Unsteady Cavitation Around a Naca66 Hydrofoil,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, p. 3696, 2019.
- [30] V. Hidalgo, X. W. Luo, X. Escaler, B. Ji, and A. Aguinaga, “Implicit large eddy simulation of unsteady cloud cavitation around a plane-convex hydrofoil,” *J.*

- Hydrodyn.*, vol. 27, no. 6, pp. 815–823, 2015.
- [31] T. Holzmann, “Mathematics , Numerics , Derivations and OpenFOAM ®,” no. November, 2019.
- [32] M. Andersen, “interphaseChangeFoam tutorial,” *Report*, p. 18, 2011.
- [33] H. Zhou, M. Xiang, P. N. Okolo, Z. Wu, G. J. Bennett, and W. Zhang, “An efficient calibration approach for cavitation model constants based on OpenFOAM platform,” *J. Mar. Sci. Technol.*, 2018.
- [34] W. Jian, M. Petkovšek, L. Houlin, B. Širok, and M. Dular, “Combined Numerical and Experimental Investigation of the Cavitation Erosion Process,” *J. Fluids Eng.*, vol. 137, no. 5, p. 051302, 2015.
- [35] M. Petkovšek and M. Dular, “Simultaneous observation of cavitation structures and cavitation erosion,” *Wear*, vol. 300, no. 1–2, pp. 55–64, 2013.
- [36] M. Dular and M. Petkovšek, “On the mechanisms of cavitation erosion - Coupling high speed videos to damage patterns,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 68, pp. 359–370, 2015.
- [37] Z. Li, *Assessment of Cavitation Erosion with a Multiphase Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method*. 2012.
- [38] A. Bakker, “Introduction to CFD Applied Computational Fluid Dynamics,” no. 2002. pp. 1–36, 2006.
- [39] R. Stallman, “Free Software , Free Society.” Boston, 2015.
- [40] V. Hugo, H. Diaz, and E. Cando, “Fedsm2014-21834 Openfoam Adapted for Debian Operating System With Lxde Based in Kernel Gnu / Linux,” pp. 1–7, 2014.
- [41] X. Escaler, M. Farhat, F. Avellan, and E. Egusquiza, “Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using surface-mounted obstacles,” *Wear*, vol. 254, no. 5–6, pp. 441–449, 2003.
- [42] X. Escaler, P. Dupont, and F. Avellan, “Experimental investigation on forces due to vortex cavitation collapse for different materials,” *Wear*, vol. 233–235, pp. 65–74, 1999.
- [43] V. Hidalgo, X. Luo, X. Escaler, E. Valencia, and P. Cruz, “Numerical simulation of the cavitation micro-jet velocity and erosion on a plane-convex hydrofoil with semicylindrical obstacle,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 240, no. 6, 2019.
- [44] “Re Number and Y+ when using K-Omega SST -- CFD Online Discussion Forums.” [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/201041-re-number-y-when-using-k-omega-sst.html>. [Accessed: 14-Nov-2019].
- [45] M. Moreno, “Simulación URANS 2D del flujo alrededor de un cilindro para $10e4 \leq Re \leq 10e6$ con tratamiento de paredes.” Universidad de las Palmas de Gran

- Canaria. Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería., 2015.
- [46] P. Castillo, “Estudio sobre la interacción fluido-estructura producida por la acción del viento alrededor de una placa plana flexible alineada con el flujo mediante simulación numérica,” Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2018.
- [47] V. H. Hidalgo, X. W. Luo, A. Yu, and R. Soto, “Cavitating flow simulation with mesh development using salome open source software,” no. Ichd, p. 6, 2014.
- [48] “OpenFOAM: User Guide: Courant number.” [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-fos-field-courant-no.html>. [Accessed: 16-Nov-2019].
- [49] I. Iñiguez, “Introducción a la simulación de fluidos Índice.” 2014.
- [50] M. Morgut, E. Nobile, and I. Biluš, “Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 37, no. 6, pp. 620–626, 2011.
- [51] G. Zhang, W. Shi, L. Zhou, and D. Zhang, “Effect of the maximum density ratio between liquid and vapor on cavitating simulation,” *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 119–126, 2015.
- [52] “OpenFOAM: User Guide: OpenFOAM®: Open source CFD : Documentation.” [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/index.html>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [53] A. Yu, Q. Tang, and D. Zhou, “Cavitation evolution around a NACA0015 hydrofoil with different cavitation models based on level set method,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, 2019.
- [54] O. Supponen, D. Obreschkow, M. Tinguely, P. Kobel, N. Dorsaz, and M. Farhat, “Scaling laws for jets of single cavitation bubbles,” *J. Fluid Mech.*, vol. 802, no. 2016, pp. 263–293, 2016.
- [55] C. J. Stimpson, C. D. Ernst, P. Knupp, P. P. Pébay, and D. Thompson, “The Verdict Geometric Quality Library,” no. March, 2007.
- [56] X. Escaler, F. Avellan, and E. Egusquiza, “Cavitation Erosion Prediction From Inferred Forces Using Material Resistance Data,” *4th Int. Symp. cavitation*, pp. 1–9, 2001.
- [57] T. D. Tran, B. Nennemann, T. C. Vu, and F. Guibault, “Investigation of cavitation models for steady and unsteady cavitating flow simulation,” *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 240–253, 2015.

- [58] H. Zhou, M. Xiang, P. N. Okolo, Z. Wu, G. J. Bennett, and W. Zhang, "An efficient calibration approach for cavitation model constants based on OpenFOAM platform," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2018.
- [59] X. B. Zheng, L. L. Liu, P. C. Guo, F. Hong, and X. Q. Luo, "Improved Schnerr-Sauer cavitation model for unsteady cavitating flow on NACA66," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 163, no. 1, 2018.
- [60] "Standard boundary conditions." [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-boundaryconditions.php>. [Accessed: 07-Nov-2019].
- [61] "OpenFOAM: wall functions." [Online]. Available: https://cpp.openfoam.org/v4/group__grpWallFunctions.html. [Accessed: 07-Nov-2019].
- [62] "Turbulence intensity -- CFD-Wiki, the free CFD reference." [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity. [Accessed: 04-Nov-2019].

ANEXOS