



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas  
y Recursos Naturales**

## **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA HÉLICE EN AGUAS ABIERTAS Y EN RÉGIMEN DE CAVITACIÓN UTILIZANDO OpenFOAM**

### **INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de

### **INGENIERA NAVAL**

Presentado por:

**STEFANY ELIZABETH CEDEÑO VERA**

**Guayaquil – Ecuador**

**2017**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, por el apoyo incondicional que me proporcionaron en todo momento de mi vida, por los valores y principios que infundieron en mí, pero más que nada, por todo el esfuerzo y sacrificio que hacen a diario para que yo alcance las metas que me proponga.

Al profesor Rubén Paredes Alvarado, por su paciencia infinita, su optimismo que contagia y su don de la enseñanza. Porque sin su guía, el desarrollo de este proyecto no habría sido posible. Gracias por confiar en mí.

## DEDICATORIA

A mis amigos del colegio, a quienes siento como si los conociera de toda la vida, sé que me disculpan por todas las fiestas y reuniones a las que no pude asistir debido al tiempo que dedicaba a mis estudios, por dejar nuestra amistad en pausa durante mis años como estudiante, y a pesar del tiempo que pasó ustedes siempre estuvieron ahí.

Todo eso valió la pena.

A mis amigos de la universidad, a los que además de amigos eran compañeros de clase e incentivaban mi sentido de la responsabilidad y mi interés en la carrera.

A todos mis amigos, a los que no tengo que mencionar porque ellos ya saben a quiénes me refiero.

**CERTIFICADO POR**

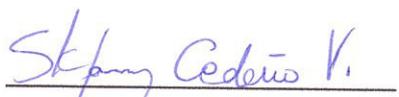


---

Rubén Paredes, PhD.  
Director de Proyecto

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.”

  
Stefany Elizabeth Cedeño Vera

## RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis del comportamiento de la hélice INSEAN E779A en aguas abiertas y en régimen de cavitación. Para esto se utilizó OpenFOAM, una herramienta computacional de código libre que contiene el solver *interPhaseChangeDyMFoam* que resuelve las ecuaciones de dos fluidos en los casos donde se presenta un cambio de fase usando el método de volumen de fluido (VoF), incluyendo además el movimiento del mallado.

Para resolver la ecuación de Momentum, el solver utiliza el algoritmo PIMPLE, una combinación de PISO y SIMPLE, que resuelve las ecuaciones de campos de presión y velocidad acoplados, donde el ciclo PISO se complementa con una iteración externa.

Para entender su funcionamiento, inicialmente se realizaron simulaciones sin movimiento del mallado con el tutorial “*cavitatingBullet*” que utiliza el solver *interPhaseChangeFoam*, que consiste en una bala dentro de un tanque con agua fluyendo a altas velocidades.

Al observar los resultados de este tutorial, se verificó la ocurrencia de cavitación a 20 m/s con la presencia de una burbuja de vapor alrededor de la bala y aunque la fuerza de presión no convergió, fue más estable comparada con los resultados en 15 m/s, donde hubo grandes fluctuaciones de fuerza y se presentó cavitación de manera inestable. Para las velocidades más bajas (5 y 10 m/s), la fuerza fue estable y no se observó cavitación.

Luego se efectuó un estudio de convergencia del tutorial “*propeller*” utilizando ocho procesadores y modificando la malla: original, media y fina. A partir de este estudio se concluyó que en este caso es más factible utilizar la malla original debido a los recursos computacionales disponibles y el tiempo que tardó en resolver el tutorial (11.5 horas) considerando la cantidad de simulaciones que se deben hacer.

También se observó que cuando la malla se refina, las fuerzas y momentum tardan más tiempo en alcanzar convergencia. Además, se realizaron simulaciones con la malla original y a varias velocidades, y se concluyó que, a mayor velocidad del fluido, la fuerza resultante es menor y alcanza convergencia en menor tiempo. Sin embargo, debido a

que se desconocen los datos experimentales de la hélice incluida en OpenFOAM, no fue posible validar los resultados.

Posteriormente, se realizaron simulaciones a varias velocidades con el mismo solver, pero utilizando la hélice INSEAN E779A para comparar con datos experimentales. Este propulsor modelo tipo Wageningen modificado es muy utilizado para validación de datos en CFD, de paso fijo, rota en el sentido de las agujas del reloj, está hecho de bronce, y es adecuado para realizar pruebas conducido desde proa.

Se utilizó el modelo de turbulencia *k-Epsilon* que cuenta con dos ecuaciones de transporte adicionales, una para  $k$  y otra para  $\epsilon$ , que deben ser resueltas junto con las ecuaciones RANS. En aguas abiertas, la velocidad rotacional de la hélice fue 707 RPM mientras que en régimen de cavitación fue de 2158 RPM.

Se ejecutaron las simulaciones considerando seis velocidades del fluido con la finalidad de obtener y graficar los coeficientes adimensionales característicos de la hélice, y con base en los resultados se puede decir que a mayor velocidad del fluido la convergencia se alcanza más rápido. Con la velocidad de 15 m/s la fuerza converge en  $t=0.08$  s, mientras que para las velocidades de 0 y 3 m/s en  $t=0.15$  segundos aún no se había alcanzado convergencia. Se cree que esto se debe a que, si la velocidad del fluido es muy baja, la hélice necesita dar más vueltas para mover el fluido hasta alcanzar estabilidad por lo tanto realiza un esfuerzo mayor. Por eso también las fuerzas de empuje resultantes son mayores a menor velocidad.

En aguas abiertas, los resultados presentaron una gran diferencia respecto a los obtenidos en el laboratorio de INSEAN. Debido a esto se concluye que este solver no puede ser utilizado para simulaciones de hélices en aguas abiertas, únicamente para simular la ocurrencia de cavitación.

Adicionalmente, se encontró que los tiempos de simulación son mayores a los del tutorial, debido a que no se alcanza convergencia en cortos períodos de tiempo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>III</b>
<b>CERTIFICADO POR .....</b>	<b>IV</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>2</b>
<b>BENEFICIOS.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Definición de Cavitación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Tipos de cavitación .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Consecuencias de la cavitación excesiva .....</b>	<b>9</b>
<b>1.4. Modelos numéricos de cavitación.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.1. Modelo de Merkle .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.2. Modelo de Kunz.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.3. Modelo de Schnerr-Sauer .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5. Descripción de la geometría de la hélice .....</b>	<b>11</b>
<b>1.6. Características de la hélice INSEAN E779A.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>17</b>

2.1.	Descripción del software OpenFOAM .....	17
2.1.1.	Ecuaciones gobernantes .....	18
2.2.	Descripción del tutorial “ <i>cavitatingBullet</i> ” .....	19
2.2.1.	Descripción del problema .....	20
2.2.2.	Descripción del algoritmo PIMPLE.....	22
2.2.3.	Análisis de resultados: Post-procesamiento .....	25
2.3.	Descripción del tutorial “ <i>propeller</i> ” .....	33
2.3.1.	Descripción del problema .....	33
2.3.2.	Modelo de Turbulencia.....	37
2.3.3.	Convergencia del mallado .....	39
2.3.4.	Análisis de resultados: Post-procesamiento .....	44
CAPÍTULO 3 .....		50
3.1.	Discretización del dominio computacional .....	50
3.2.	Descripción de condiciones iniciales y condiciones de frontera .....	51
3.3.	Resultados en aguas abiertas .....	55
CONCLUSIONES.....		59
RECOMENDACIONES .....		61
REFERENCIAS.....		62
ANEXOS .....		63
ANEXO A: Vistas del campo $\alpha$ .water del tutorial “ <i>cavitatingBullet</i> ” .....		64
ANEXO B: Vistas del componente z de la velocidad del fluido en el tutorial “ <i>cavitatingBullet</i> ” .....		68

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Cavitación tipo vórtice en el eje y en las puntas de las palas. ....	4
<b>Figura 2.</b> Daños por cavitación en una hélice.....	5
<b>Figura 3.</b> Tipos de cavitación en la hélice. ....	7
<b>Figura 4.</b> Cavitación de hoja y de burbuja en un hidrofolio. ....	7
<b>Figura 5.</b> Cavitación de nube en un hidrofolio. ....	8
<b>Figura 6.</b> Geometría de la hélice. ....	12
<b>Figura 7.</b> Paso de la hélice.....	12
<b>Figura 8.</b> Ángulo de inclinación circunferencial (skew angle) de la hélice.....	13
<b>Figura 9.</b> Ángulo de inclinación axial (rake angle) de la hélice. ....	13
<b>Figura 10.</b> Esquema ampliado de las secciones de la pala. ....	15
<b>Figura 11.</b> Estructura general de OpenFOAM. ....	17
<b>Figura 12.</b> Vista de la bala cavitando en $t = 0.05$ segundos. ....	20
<b>Figura 13.</b> Directorio del caso “cavitatingBullet”. ....	20
<b>Figura 14.</b> Discretización del dominio del tutorial “cavitatingBullet”. ....	22
<b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo del algoritmo SIMPLE.....	23
<b>Figura 16.</b> Diagrama de flujo del algoritmo PISO. ....	24
<b>Figura 17.</b> Vista de la bala, $V = 20$ m/s; $t = 0.001$ segundos. ....	25
<b>Figura 18.</b> Vistas del campo alpha.water; $t = 0.052-0.054$ s.....	29
<b>Figura 19.</b> Vistas del campo alpha.water; $t = 0.058-0.060$ s.....	30
<b>Figura 20.</b> Vistas del componente z de la velocidad, $t = 0.052-0.054$ s. ....	31
<b>Figura 21.</b> Vistas del componente z de la velocidad, $t = 0.058-0.060$ s. ....	32
<b>Figura 22.</b> Vistas de la hélice del tutorial “propeller”. ....	34
<b>Figura 23.</b> Vista del túnel y la hélice.....	34
<b>Figura 24.</b> Directorio del caso “propeller”. ....	35
<b>Figura 25.</b> Componentes de las ecuaciones de $k$ y $\epsilon$ . ....	38
<b>Figura 26.</b> Corte longitudinal y transversal con malla gruesa. ....	42
<b>Figura 27.</b> Corte longitudinal y transversal con malla media. ....	42
<b>Figura 28.</b> Corte longitudinal y transversal con malla fina. ....	42

<b>Figura 29.</b> Vista de la hélice con malla gruesa. ....	43
<b>Figura 30.</b> Vista de la hélice con malla media. ....	43
<b>Figura 31.</b> Vista de la hélice con malla fina. ....	43
<b>Figura 32.</b> Vista longitudinal del dominio durante la cavitación. ....	47
<b>Figura 33.</b> Corte longitudinal y transversal del mallado de la hélice INSEAN E779A....	50
<b>Figura 34.</b> Tanque de arrastre #2 del CEIMM. ....	51
<b>Figura 35.</b> Condiciones de frontera del túnel y la hélice. ....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones de la hélice modelo INSEAN E779A.....	14
<b>Tabla 2.</b> Dimensiones de la hélice y el túnel del tutorial “propeller”.....	33
<b>Tabla 3.</b> Velocidad del fluido en la entrada del túnel, dirección “y”.....	35
<b>Tabla 4.</b> Velocidad rotacional de la hélice del tutorial “propeller”.....	36
<b>Tabla 5.</b> Características del computador.....	40
<b>Tabla 6.</b> Tipos de mallado en el estudio de convergencia.....	40
<b>Tabla 7.</b> Resultados de fuerzas y Momentum para las tres mallas.....	46
<b>Tabla 8.</b> Coeficientes adimensionales para diferentes velocidades de entrada.....	48
<b>Tabla 9.</b> Valores iniciales para el modelo de turbulencia.....	52
<b>Tabla 10.</b> Velocidad rotacional de la hélice INSEAN.....	53
<b>Tabla 11.</b> Características del agua y del vapor.....	53
<b>Tabla 12.</b> Condiciones de frontera para cada sección del túnel.....	54
<b>Tabla 13.</b> Resultados de empuje y torque experimentales y de CFD.....	55
<b>Tabla 14.</b> Valores de $K_T$ y $K_Q$ experimentales y de CFD.....	55

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Fuerzas de presión en la bala, $t = 0.0-0.1$ s.....	26
<b>Gráfico 2.</b> Fuerzas de presión en la bala, $t = 0.05-0.06$ s.....	27
<b>Gráfico 3.</b> Fuerzas sobre la hélice debido a presión y viscosidad en las tres mallas....	44
<b>Gráfico 4.</b> Momentum sobre la hélice debido a presión y viscosidad en las tres mallas. .....	45
<b>Gráfico 5.</b> Fuerza de empuje sobre la hélice para diferentes velocidades.....	46
<b>Gráfico 6.</b> Momentum sobre la hélice para diferentes velocidades. ....	48
<b>Gráfico 7.</b> Coeficientes adimensionales de la hélice del tutorial “propeller”.....	49
<b>Gráfico 8.</b> Fuerza de empuje de la hélice INSEAN para diferentes velocidades del fluido. .....	56
<b>Gráfico 9.</b> Torque sobre la hélice INSEAN para diferentes velocidades del fluido.....	56
<b>Gráfico 10.</b> $K_T$ experimental y CFD versus $J$ .....	57
<b>Gráfico 11.</b> $10*K_Q$ experimental y CFD versus $J$ .....	58

## ABREVIATURAS

AMI	<i>Arbitrary Mesh Interphase</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIMM	<i>Centro Esperienze Idrodinamiche della Marina Militare</i>
EAR	<i>Expanded Area Ratio</i>
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
INSEAN	<i>Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale</i>
ITTC	<i>International Towing Tank Conference</i>
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MULES	<i>Multi-dimensional Universal Limiter for Explicit Solution</i>
OBJ	<i>Object file</i>
OpenFOAM	<i>Open Source Field Operation and Manipulation</i>
PIMPLE	PISO – SIMPLE
PISO	<i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RPM	Revoluciones por minuto
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
STL	<i>Stereolithography file</i>
VoF	<i>Volume of Fluid</i>

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el incremento de la velocidad de navegación de los buques requiere motores con mayores potencias y hélices con velocidades de rotación más altas, por lo que el problema de la cavitación ha ganado importancia en el diseño de hélices marinas.

La cavitación es un fenómeno complejo que disminuye gradualmente el rendimiento de la hélice. En su etapa inicial produce vibraciones, ruido y daño físico, y en casos extremos provoca la pérdida de empuje e incremento del consumo de combustible, que representa pérdidas económicas al armador, siendo necesario varar la embarcación para reparar o reemplazar la hélice.

La *International Towing Tank Conference* (ITTC), formada por institutos de investigación, universidades e industrias, recomienda procedimientos que aseguren resultados confiables en las pruebas experimentales y numéricas (CFD) con modelos a escala para estudiar la cavitación alrededor de hélices marinas.

En el presente trabajo se valida la simulación numérica utilizando datos experimentales del propulsor modelo INSEAN E779A que es ampliamente estudiado con avanzadas técnicas de medición y visualización de flujo. Se trata de una hélice de paso fijo, con 04 palas, que rota en el sentido de las agujas del reloj y que fue diseñada en el año 1959 para un ferry de doble hélice. [3]

Para el desarrollo de la simulación de la hélice en un túnel de cavitación se emplea una herramienta de CFD de código abierto llamada OpenFOAM, que contiene un solver que simula la ocurrencia de cavitación en una hélice siguiendo el modelo desarrollado por Schnerr-Sauer. Además utiliza el algoritmo de volumen de fluido (*VoF*) e incluye el movimiento del mallado, al que previamente se le realiza un refinamiento adaptándolo a la superficie de la hélice.

Finalmente los resultados numéricos de la simulación de la cavitación son comparados con los obtenidos de manera experimental por el INSEAN. Además se visualizan las

zonas donde es más probable que se presente cavitación, por medio de una herramienta de post procesamiento llamada *ParaView*.

El presente trabajo se constituye en el primer paso para predecir cavitación en hélices comerciales y pretende también explicar el funcionamiento de una de las tantas aplicaciones que tiene OpenFOAM, para que pueda servir para estudios posteriores cuando se tengan datos de hélices a escala real durante la cavitación.

### **OBJETIVO GENERAL**

- Analizar el comportamiento de la hélice INSEAN E779A operando en aguas abiertas y en régimen de cavitación utilizando OpenFOAM.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Entender el funcionamiento del solver *interPhaseChangeDyMFoam* usando el tutorial de "*propeller*".
- Obtener los valores de  $K_T$ ,  $K_Q$ , distribución de presión y eficiencia para diferentes velocidades del fluido, con la hélice operando en aguas abiertas.
- Comparar los resultados numéricos con los resultados experimentales de la hélice INSEAN E779A operando en régimen no cavitante en aguas abiertas.
- Identificar las zonas que presentan cavitación utilizando la herramienta de post procesamiento *ParaView*.

## **METODOLOGÍA**

En este trabajo se desarrollan varias simulaciones para la predicción de cavitación de manera numérica y los resultados son validados utilizando datos experimentales proporcionados por INSEAN.

Este documento consta de tres capítulos, en el primero se describe el fenómeno de la cavitación, su clasificación y consecuencias, además se describe la geometría y las características de la hélice INSEAN E779A.

En el segundo capítulo se explica de manera general el funcionamiento de OpenFOAM y del solver *interPhaseChangeFoam* utilizando el tutorial "*cavitatingBullet*". Finalmente se detalla el funcionamiento del solver *interPhaseChangeDyMFoam*, que comprende la explicación del modelo numérico y los pasos para realizar el tutorial "*propeller*", incluyendo un análisis de convergencia de la malla.

En el tercer capítulo se presentan los resultados de la simulación realizada con la hélice modelo y se comparan con los resultados experimentales proporcionados por INSEAN.

## **BENEFICIOS**

Este trabajo constituye un primer paso en el estudio de la cavitación en propulsores marinos en Ecuador. Proporciona pautas en el uso de CFD a los profesionales de las ramas de ingeniería y análisis de fluidos, en especial a quienes se dedican al diseño de propulsores. Ayuda a entender el funcionamiento de OpenFOAM para utilizarlo como herramienta en el análisis del desempeño de la hélice y en la predicción de cavitación.

En general, las herramientas computacionales que utilizan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) son alternativas confiables y de bajo costo para realizar simulaciones e identificar posibles fallas antes de la construcción. Con esto se reduce la necesidad de efectuar pruebas experimentales.

Recientemente, la plataforma de código abierto OpenFOAM, ha ganado popularidad en el desarrollo de simulaciones numéricas de la cavitación en hélices marinas. Se han presentado diversos trabajos de investigación que demuestran los beneficios de utilizar esta herramienta de CFD en diferentes áreas de ingeniería.

## CAPÍTULO 1

En este capítulo se define la cavitación en propulsores marinos, se describen los tipos de cavitación y sus consecuencias. Al final del capítulo se presenta la geometría y se identifican las características de la hélice usada para el desarrollo de este proyecto.

### 1.1. Definición de Cavitación

La cavitación puede ser definida de manera general como un fenómeno de la mecánica de fluidos que puede ocurrir cada vez que una máquina induce fluctuaciones de presión y velocidad en un fluido. [1]

Expresado de otra manera, la cavitación es un fenómeno altamente complejo en el que el agua se evapora a temperatura ambiente, debido a que la presión del líquido alcanza valores menores a su presión de vapor. Durante el cambio de fase se forman pequeñas burbujas de gas o “cavidades” que se desplazan a zonas de mayor presión e implosionan sobre la superficie, es decir que se condensan de manera súbita pudiendo ocasionar daños físicos.

**Figura 1.** Cavitación tipo vórtice en el eje y en las puntas de las palas.



**Fuente:** [www.thehulltruth.com](http://www.thehulltruth.com)

Este problema se puede presentar en propulsores, turbinas, cojinetes, en los álabes de los rodets de las bombas, en las plantas e incluso en el cuerpo humano.

En el caso específico de las hélices marinas, su movimiento a través del agua causa una presión positiva en la cara que está hacia popa (cara de presión) y una presión negativa en la cara que está hacia proa (cara de succión).

Con el giro de la hélice, el líquido alcanza una gran velocidad por lo tanto la presión disminuye y se produce una descompresión del fluido, esto se explica con el principio de conservación de Bernoulli. Una vez que el agua alcanza la presión de vapor, sus moléculas cambian de fase y se forman las burbujas de gas o cavidades.

Cuando se produce la cavitación, el daño por lo general aparece en la cara de succión, donde se alcanzan las presiones más bajas. Estos daños también suelen aparecer en la cara de presión, en cuyo caso se debe a una incorrecta distribución del paso de la hélice.

**Figura 2.** Daños por cavitación en una hélice.



**Fuente:** [www.commons.wikimedia.org](http://www.commons.wikimedia.org)

Existen varios factores que influyen la ocurrencia de la cavitación, por lo tanto, explicar este fenómeno como agua hirviendo a temperatura constante, aunque sea parcialmente cierto, es una excesiva simplificación de lo que realmente ocurre a nivel físico y químico.

Un parámetro usado en diseño de hélices es el número de cavitación, que sirve para caracterizar qué tan cerca está la presión del fluido de alcanzar la presión de vapor, y se define como: [1]

$$\sigma_0 = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_A^2} \quad (1)$$

Donde:

$p_0$ : presión absoluta.

$p_v$ : presión de vaporización del fluido a temperatura ambiente.

$\rho$  (*rho*): densidad del fluido.

$V_A$ : velocidad del fluido.

El resultado es un número adimensional, proveniente de la relación entre el cabezal de presión estática y el cabezal de presión dinámica. A mayores valores de sigma  $\sigma$ , menor será la ocurrencia de cavitación en el fluido.

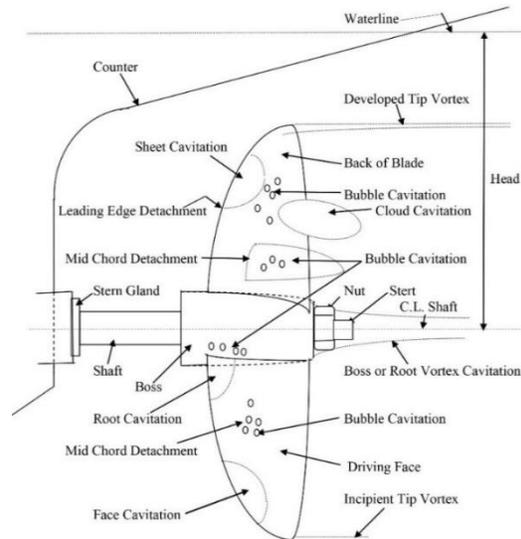
Grandes valores del número de cavitación usualmente corresponden a grandes valores de la presión local. Por lo tanto, podría esperarse que en cualquier lugar la presión local esté por encima de la presión de vapor y que el flujo permanezca libre de cavitación. Este número es un parámetro sólo para flujos que cavitan, para los cuales puede ser considerado como un parámetro de escala que mide el alcance global de la cavitación.

En líquidos, se suele asumir que la cavitación ocurre cuando se ha alcanzado la presión de vaporización (0.2 psi a 14 °C), pero debido al alto contenido de aire disuelto en el agua de mar se produce la formación temprana de cavidades o burbujas y es probable que la cavitación ocurra a presiones locales tan altas como 2.5 psi. [2]

## 1.2. Tipos de cavitación

En todo propulsor marino se pueden presentar diferentes patrones de cavitación, muchos de los cuales pueden ser relativamente benignos, mientras que otros pueden ser muy agresivos. En la Figura 3 se muestra una de las posibles clasificaciones según su apariencia y ubicación, y a continuación se describen cada una de ellas:

**Figura 3.** Tipos de cavitación en la hélice.



**Fuente:** [www.iims.org.uk](http://www.iims.org.uk)

- Cavitación de hoja (*Sheet cavitation*): es una región de vapor que permanece aproximadamente en la misma posición como si estuviera adherida a la pala. En la Figura 4, el fluido va de izquierda a derecha y se observa que la cavitación de hoja no empieza exactamente en el borde de ataque del folio.

**Figura 4.** Cavitación de hoja y de burbuja en un hidrofolio.



**Fuente:** [www.cavity.caee.utexas.edu](http://www.cavity.caee.utexas.edu)

- Cavitación de burbuja (*Bubble cavitation*): se presenta cuando las burbujas de vapor crecen hasta un tamaño visible debido a la baja presión externa. El origen de cada burbuja es un núcleo que crece cuando la presión disminuye. En la Figura

4, cerca del final de la cavitación de hoja se pueden observar las burbujas de vapor que se desprenden del folio.

- Cavitación de cara (*Face cavitation*): es poco frecuente, se presenta en la superficie de las palas en la cara de presión. Se produce cuando el borde de ataque es muy afilado.
- Cavitación de raíz (*Root cavitation*): se presenta en las palas en las zonas cercanas al eje, ver Figura 2.
- Cavitación de nube (*Cloud cavitation*): es muy inestable y extremadamente agresiva debido a los efectos dañinos del colapso de grandes cantidades de burbujas, debe ser tratada con precaución y de ser posible eliminarla, ver Figura 5.

**Figura 5.** Cavitación de nube en un hidrofolio.



**Fuente:** [www.cavity.caee.utexas.edu](http://www.cavity.caee.utexas.edu)

- Cavitación de vórtice en los extremos de las palas (*Tip vortex cavitation*): se presenta debido a la baja presión en las puntas de las palas de la hélice, en la Figura 1 se muestra una hélice con cavitación donde se observan vórtices saliendo de los extremos de las palas.
- Cavitación de vórtice en el eje o raíz (*Boss/Hub/Root vortex cavitation*): generalmente es la primera en presentarse y se debe a la distribución radial de la carga de la hélice, la variación de la estela y el diseño de la punta de las palas, en la Figura 1 se observa el vórtice saliendo del eje de la hélice.

Las mayores caídas de presión ocurren en la cara de succión de la hélice y es donde hay mayor presencia de cavitación de hoja y de burbuja. Se dice que una hélice está cavitando completamente cuando toda la cara de succión está cubierta de cavitación de hoja. A este fenómeno también se le conoce como súper cavitación.

### **1.3. Consecuencias de la cavitación excesiva**

Las hélices más propensas a cavitarse son las que se encuentran trabajando en condiciones de mal clima o cuando la embarcación no ha realizado carenamiento, en las que, luego de alcanzar un número crítico de revoluciones, se produce un cambio de fase en el flujo de manera progresiva, esto ocasiona:

- Vibraciones y ruidos, similares a piedras golpeando el casco.
- La implosión de las burbujas de vapor ocasionan picaduras (*pitting*) que siguen un patrón radial sobre la superficie del propulsor.
- Erosión sobre las palas de la hélice y en la pala del timón.
- Progresiva pérdida de material.
- Desgaste de la capa de óxido que protege el metal y la posterior corrosión severa.
- Acorta enormemente la vida útil de la hélice.
- En casos extremos, se produce una pérdida de empuje e impide a la embarcación alcanzar la velocidad deseada.
- Esto conlleva a una disminución gradual del rendimiento de la hélice y un incremento en el consumo de combustible.

Si el problema de cavitación no es solucionado a tiempo puede representar pérdidas económicas al armador, quien debe varar la embarcación y destinar recursos económicos para reparar o reemplazar la hélice.

### **1.4. Modelos numéricos de cavitación**

Para la predicción de cavitación en OpenFOAM han sido implementados tres modelos de transferencia de masa para simular el cambio de fase entre vapor y líquido, los cuales se explican a continuación:

### 1.4.1. Modelo de Merkle

Este modelo consta de una ecuación para la condensación  $\dot{m}^+$  (transformación de vapor a líquido) y una ecuación para la vaporización  $\dot{m}^-$  (transformación de líquido a vapor):

$$\dot{m}^+ = \frac{C_c}{\frac{1}{2}U_\infty^2 t_\infty} (1 - \alpha) \max(0, p - p_{sat}) \quad (2)$$

$$\dot{m}^- = \frac{C_v \rho_v}{\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 t_\infty} \alpha \min(0, p - p_{sat}) \quad (3)$$

Donde:

$C_c$ ,  $C_v$ ,  $U_\infty$  y  $t_\infty$  son constantes empíricas basadas en el flujo promedio.

$\rho_l$  y  $\rho_v$  son las densidades del líquido y del vapor.

$p$  es la presión.

$p_{sat}$  es la presión de vaporización.

La vaporización  $\dot{m}^-$  es directamente proporcional a la fracción volumétrica del vapor,  $\alpha = \text{volumen de vapor} / \text{volumen total}$ , y a la cantidad por la cual la presión local está bajo la presión de saturación. La condensación  $\dot{m}^+$  está modelada de manera similar. En la implementación del solver *interPhaseChangeFoam* estas ecuaciones se dividen en el  $\alpha$ -loop y en el  $p$ -loop. En el  $\alpha$ -loop todo se mantiene constante excepto alfa; en el  $p$ -loop todo se mantiene constante menos la presión [5].

### 1.4.2. Modelo de Kunz

Este modelo está basado en el trabajo de Merkle, con una modificación que corresponde al comportamiento del fluido cerca del punto de transición. Se puede observar que el término de la condensación  $\dot{m}^-$  está siempre activo, independientemente de la presión.

$$\dot{m}^- = \frac{C_c \rho_v}{t_\infty} \gamma^2 (1 - \gamma) \quad (4)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_v \rho_v}{\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 t_\infty} \gamma \min(0, p - p_{sat}) \quad (5)$$

La destrucción del líquido o creación de vapor  $\dot{m}^+$  es directamente proporcional a la cantidad por la cual la presión local está bajo la presión de saturación. La destrucción de vapor  $\dot{m}^-$  está basada en una función polinomial de tercer orden de la fracción volumétrica del líquido  $\gamma = \text{volumen de líquido} / \text{volumen total}$ . [5]

### 1.4.3. Modelo de Schnerr-Sauer

Este modelo fue desarrollado como una mezcla líquida que contiene una gran cantidad de burbujas esféricas y está basado en la dinámica de esas burbujas, considerando la ecuación de movimiento de una sola burbuja de radio  $R$  y utilizando la ecuación de Rayleigh-Plesset para modelar el crecimiento de burbujas.

$$\dot{m} = \text{sign}(p_{sat} - p) \frac{n_0}{1 + n_0 \frac{4}{3} \pi R^3} 4\pi R^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_{sat} - p|}{\rho_l}} \quad (6)$$

Donde  $n_0$  representa la densidad de micro burbujas y  $R$  es el radio del núcleo inicial que en OpenFOAM es representado como  $dNuc$ . Para simular la vaporización y la condensación en diferentes escalas de tiempo, los coeficientes  $C_c$  y  $C_v$  pueden ser introducidos en la ecuación (6) y en el modelo original de Schnerr-Sauer estos parámetros son iguales a 1.

En los modelos de cavitación de Merkle y Kunz, la tasa de transferencia de masa es  $\dot{m} = \dot{m}^+ + \dot{m}^-$  y se define por separado; donde una ecuación corresponde a la vaporización y la otra corresponde a la condensación [5].

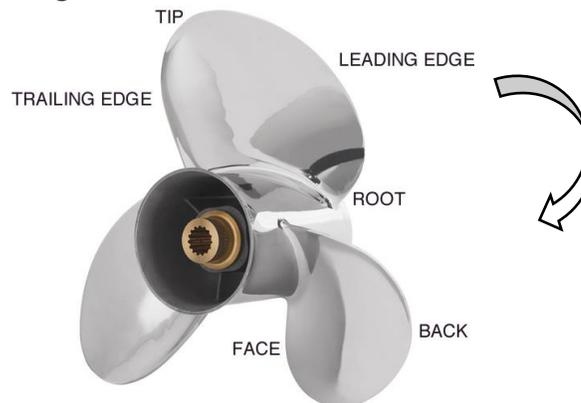
### 1.5. Descripción de la geometría de la hélice

Para entender mejor la geometría de la hélice, es necesario conocer los diferentes términos técnicos con que se define:

- Cara frontal (*Face*): también conocida como cara de presión, es el lado de la hélice que se encuentra hacia popa.

- Cara posterior (*Back*): también conocida como cara de succión, es el lado de la hélice que se encuentra hacia proa.
- Borde de ataque (*Leading edge*): es el borde de la pala que corta el agua cuando la hélice está rotando.
- Borde de salida (*Trailing edge*): es el borde posterior de la pala.

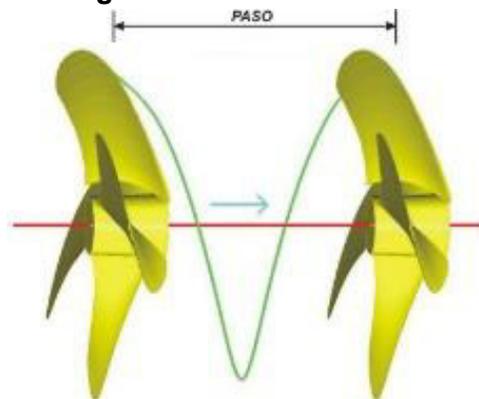
**Figura 6.** Geometría de la hélice.



**Fuente:** [www.crowleymarine.com](http://www.crowleymarine.com)

- Paso de la hélice (*pitch propeller*): es el avance de la hélice en una vuelta completa. Las hélices pueden ser de paso fijo o paso variable.

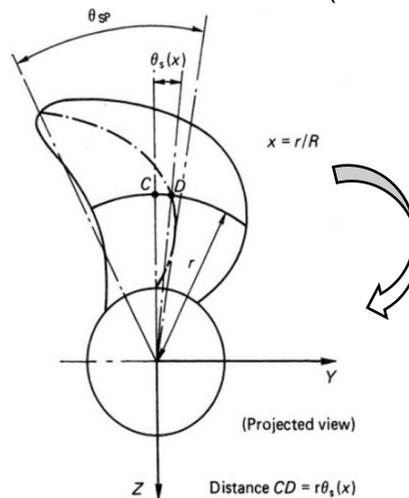
**Figura 7.** Paso de la hélice.



**Fuente:** [www.navegar.com](http://www.navegar.com)

- Ángulo de inclinación circunferencial (*skew angle*): es el ángulo más grande medido entre dos líneas que salen del centro del eje y cortan de manera tangencial los extremos de la línea media de la pala. Es decir, el ángulo de inclinación de la pala  $\theta_{SP}$  vista en el plano  $y$ - $z$ , ver Figura 8. Este ángulo es positivo cuando su dirección es contraria a la rotación de la hélice. [1]

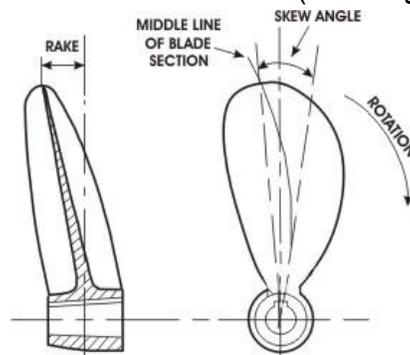
**Figura 8.** Ángulo de inclinación circunferencial (*skew angle*) de la hélice.



**Fuente:** Carlton, J. [1]

- Ángulo de inclinación axial (*rake angle*): es el ángulo de inclinación de la pala respecto al eje. Si la cara de la pala es perpendicular al eje, la hélice tiene una inclinación axial de cero grados. Este ángulo es positivo si la inclinación es hacia popa y negativo si es hacia proa [1], ver Figura 9.

**Figura 9.** Ángulo de inclinación axial (*rake angle*) de la hélice.



**Fuente:** www.ricepropulsion.com

### 1.6. Características de la hélice INSEAN E779A

Esta hélice fue utilizada por primera vez en 1959 por un ferry de doble hélice, pero lamentablemente no existen datos de su desempeño a escala real. En los años 60's el modelo de este propulsor fue escogido como referencia para las investigaciones desarrolladas por el CEIMM (*Centro Esperienze Idrodinamiche della Marina Militare*) en Roma, Italia [3].

A partir del año 1997, el INSEAN (*Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale*) inició un proyecto con el objetivo de obtener datos de alta calidad para la validación de CFD. Se realizaron mediciones de campos de velocidad, de presión y patrones de cavitación, utilizando la técnica LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) de muestreo de fase para medir la velocidad y PIV (*Particle Image Velocimetry*) para la visualización del flujo [11].

Este modelo es una hélice tipo Wageningen modificada, de paso fijo, que rota en el sentido de las agujas del reloj y está hecha de bronce, el eje está tapado y es adecuado para realizar pruebas con la hélice conducida desde proa. En la Tabla 1 se muestran las dimensiones principales de la hélice INSEAN E779A:

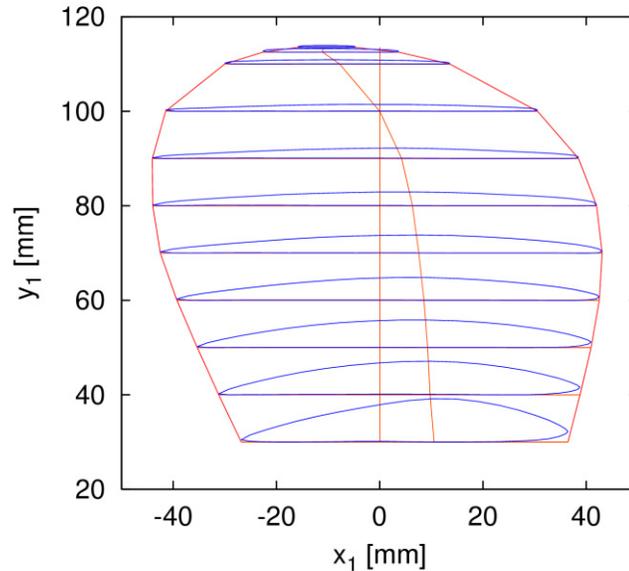
**Tabla 1.** Dimensiones de la hélice modelo INSEAN E779A.

<b>Diámetro de la hélice</b>	$D_P = 227.3 \text{ mm}$
<b>Número de palas</b>	$Z = 4$
<b>Relación Paso/Diámetro (nominal)</b>	$P/D_P = 1.1$
<b>Skew angle (en la punta de la pala)</b>	$\theta = 4^\circ 48'$ (positivo)
<b>Rake angle (nominal)</b>	$i = 4^\circ 35'$ (hacia proa)
<b>Relación de área expandida</b>	$EAR = 0.689$
<b>Diámetro del eje (en la línea de ref.)</b>	$D_H = 45.5 \text{ mm}$
<b>Longitud del eje</b>	$L_H = 68.3 \text{ mm}$

**Fuente:** INSEAN Propulsion and Cavitation Laboratory [3]

La forma de cada pala de la hélice está definida por 11 secciones radiales que van desde  $r/R_P = 0.264$  hasta  $r/R_P = 0.9988$ ; siendo  $R_P$  el radio de la hélice.

**Figura 10.** Esquema ampliado de las secciones de la pala.



**Fuente:** INSEAN Propulsion and Cavitation Laboratory [3]

En el año 2005, en el tanque de arrastre del CEIMM se realizaron pruebas en aguas abiertas con la hélice INSEAN E779A, con la finalidad de obtener resultados fiables para validación de CFD. A partir de estos resultados experimentales se obtuvieron los coeficientes adimensionales que definen el desempeño general de la hélice [2]:

Coefficiente de avance:

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (7)$$

Coefficiente de empuje:

$$K_T = \frac{T}{\rho \times n^2 \times D^4} \quad (8)$$

Coefficiente de torque:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \times n^2 \times D^5} \quad (9)$$

Eficiencia en aguas abiertas:

$$\eta_0 = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (10)$$

Donde:

$V_A$  es la velocidad de avance del fluido en m/s;

$n$  es la velocidad de rotación de la hélice en rev/s;

$D$  es el diámetro de la hélice en metros;

$T$  es la fuerza de empuje en Newtons;

$\rho$  (rho) es la densidad del agua en  $\text{kg/m}^3$ ;

$Q$  es el torque en Newtons-metros.

## CAPÍTULO 2

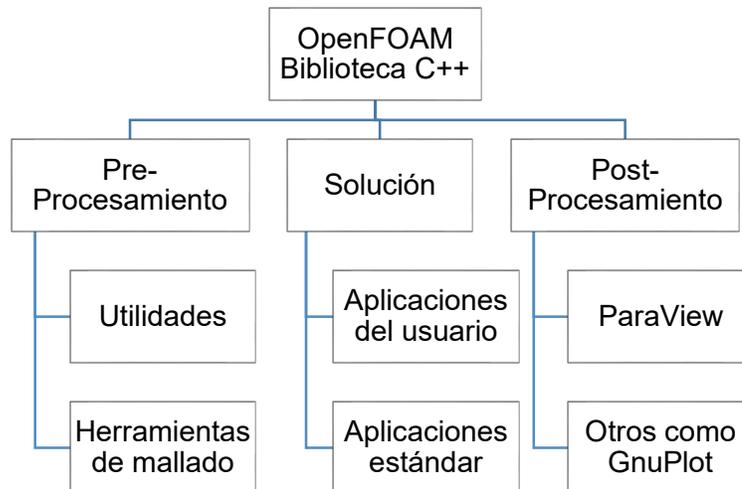
En este capítulo se hace una descripción general del software haciendo énfasis en el tutorial de cavitación de la hélice, se explica el funcionamiento del solver utilizado, además se especifican las ecuaciones gobernantes y los modelos de turbulencia disponibles en OpenFOAM. Finalmente se presentan los resultados obtenidos.

### 2.1. Descripción del software OpenFOAM

OpenFOAM es la abreviatura de *Open Source Field Operation and Manipulation*, es un programa de código abierto de dinámica de fluidos computacionales (CFD), que utiliza lenguaje de programación C++, y ha sido desarrollado por OpenCFD Ltd. desde el año 2004.

OpenFOAM cuenta con una extensa gama de aplicaciones para resolver problemas, desde flujos de fluidos complejos que involucran reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor, hasta acústicos, mecánica de sólidos y electromagnéticos. Para mayor información consultar las fuentes [6] y [8].

**Figura 11.** Estructura general de OpenFOAM.



**Fuente:** [www.openfoam.com](http://www.openfoam.com)

### 2.1.1. Ecuaciones gobernantes

Existen tres ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido y representan de forma matemática las leyes de conservación de la física: la ecuación de la continuidad o conservación de masa, la conservación de Momentum o segunda ley de Newton y la ecuación de la conservación de la energía o primera ley de la termodinámica.

La ecuación en 3 dimensiones para la conservación de masa o ecuación de la continuidad en un fluido compresible depende de la densidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

Para fluidos incompresibles como los líquidos la densidad es constante, por lo tanto la ecuación (11) se reduce a:

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

La ecuación (12) indica que el flujo neto de masa que pasa a través del elemento se mantiene constante, es decir que la masa del fluido se conserva.

La segunda ley de Newton establece que la tasa de cambio de Momentum de una partícula de fluido es igual a la suma de fuerzas en la partícula. Se distinguen dos tipos de fuerzas en el fluido: las fuerzas de superficie, que pueden ser de presión, viscosas o de gravedad, y las fuerzas de cuerpo. Es muy común tratar a las fuerzas de superficie como términos separados en la ecuación de Momentum e incluir los efectos de las fuerzas de cuerpo como términos fuente.

Las ecuaciones de Momentum se obtienen igualando la tasa de cambio del Momentum en el fluido con la fuerza total debido a los esfuerzos de superficie, más la tasa de incremento del Momentum debido a fuerzas de cuerpo [7]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (13.a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (13.b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (13.c)$$

Las ecuaciones (13.a-c) representan los componentes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de la ecuación de Momentum. Los términos fuente  $S_{Mx}$ ,  $S_{My}$  y  $S_{Mz}$  incluyen únicamente las contribuciones debido a las fuerzas de cuerpo. Estas ecuaciones están en forma no conservativa y son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes<sup>1</sup>.

Las ecuaciones de Navier-Stokes (13.a-c) se escriben en su forma más útil para el desarrollo del método de volumen finito que utiliza OpenFOAM:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (14.a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (14.b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (14.c)$$

Para la discretización del tiempo OpenFOAM utiliza el esquema de diferenciación de Euler y adopta un esquema de diferenciación de segundo orden para los componentes de la ecuación de Momentum.

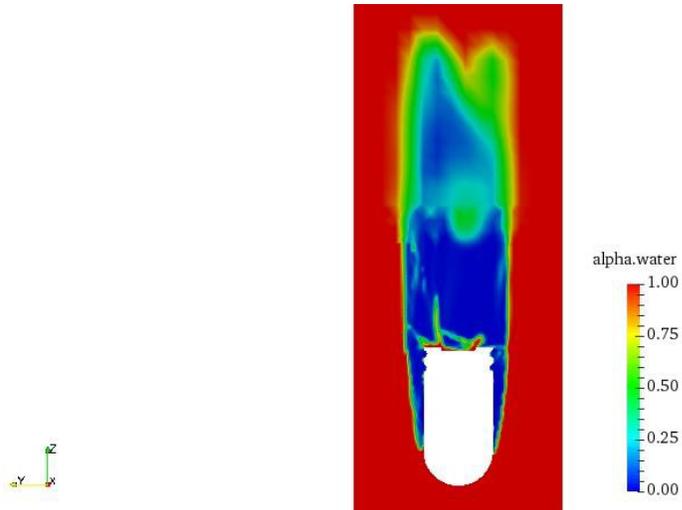
## 2.2. Descripción del tutorial “*cavitatingBullet*”

Para explicar el funcionamiento del solver *interPhaseChangeFoam*, se va a describir el tutorial “*cavitatingBullet*” que simula una bala que cavita dentro de un tanque con agua.

---

<sup>1</sup> En honor a Claude Navier y George Stokes, quienes de manera independiente obtuvieron las ecuaciones en la primera mitad del siglo XIX.

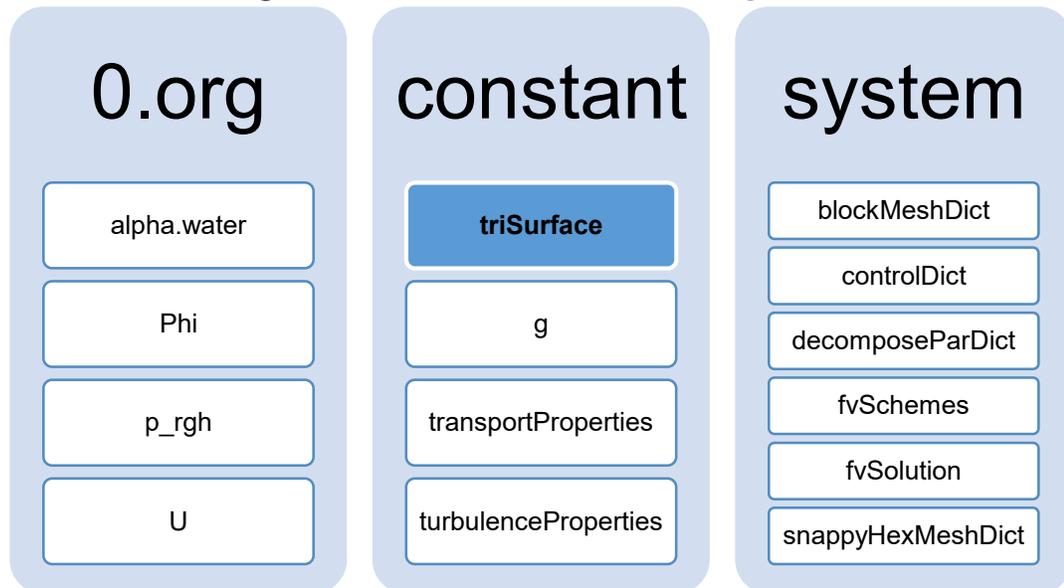
**Figura 12.** Vista de la bala cavitando en  $t = 0.05$  segundos.



### 2.2.1. Descripción del problema

Consiste en una bala de 20 mm de largo y 10 mm de diámetro, que se encuentra rodeada de agua líquida, dentro de un tanque que mide 30 mm de base y 115 mm de altura. El fluido, en este caso laminar, se mueve a una velocidad de 20 m/s en dirección “z”.

**Figura 13.** Directorio del caso “*cavitatingBullet*”.



**Fuente:** OpenFOAM

El directorio del caso contiene las carpetas: "0.org", "constant" y "system", similar a los directorios de otros tutoriales en OpenFOAM.

La carpeta "0.org" contiene los archivos donde se indican las condiciones iniciales para el cambio de fase, la presión, la velocidad y el potencial de velocidad.

**alpha.water** es el indicador de fase, es un número adimensional cuyo valor inicial es 1 que corresponde a agua totalmente líquida, y el valor 0 corresponde a agua en estado gaseoso.

**p\_rgh** es la presión absoluta, calculada como  $p - \rho \times g \times h$ , donde  $\rho$  (rho) es la densidad,  $g$  es la gravedad (-9.8 m/s<sup>2</sup>) y  $h$  es la altura. En este caso el valor inicial es 1E5 Pascales.

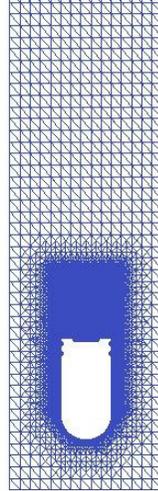
**U** es la velocidad que en este caso es (0 0 20), es decir 20 m/s en dirección z positivo.

**Phi** es el potencial de velocidad, cuyo valor inicial es 0.

La carpeta "constant" contiene valores constantes usados en la simulación, incluye la gravedad, las propiedades de transporte, el modelo de turbulencia que en este caso es laminar y la geometría de la bala dentro de la carpeta "triSurface". En el archivo **transportProperties** se indica la presión de saturación del agua, la tensión superficial entre dos fases, la densidad y la viscosidad del agua y del vapor, además se especifican los modelos de cavitación y los coeficientes para cada uno de ellos. En este caso el modelo utilizado es Schnerr-Sauer.

La carpeta "system" contiene archivos con diferentes parámetros para configurar la simulación. En **blockMeshDict** se describe el mallado y se definen las fronteras.

**Figura 14.** Discretización del dominio del tutorial “*cavitatingBullet*”.



El archivo **controlDict** contiene variables de control como el tiempo y permite configurar la impresión de resultados en archivos separados. El archivo **decomposeParDict** indica la cantidad de procesadores utilizados en la descomposición del dominio para el procesamiento en paralelo.

### 2.2.2. Descripción del algoritmo PIMPLE

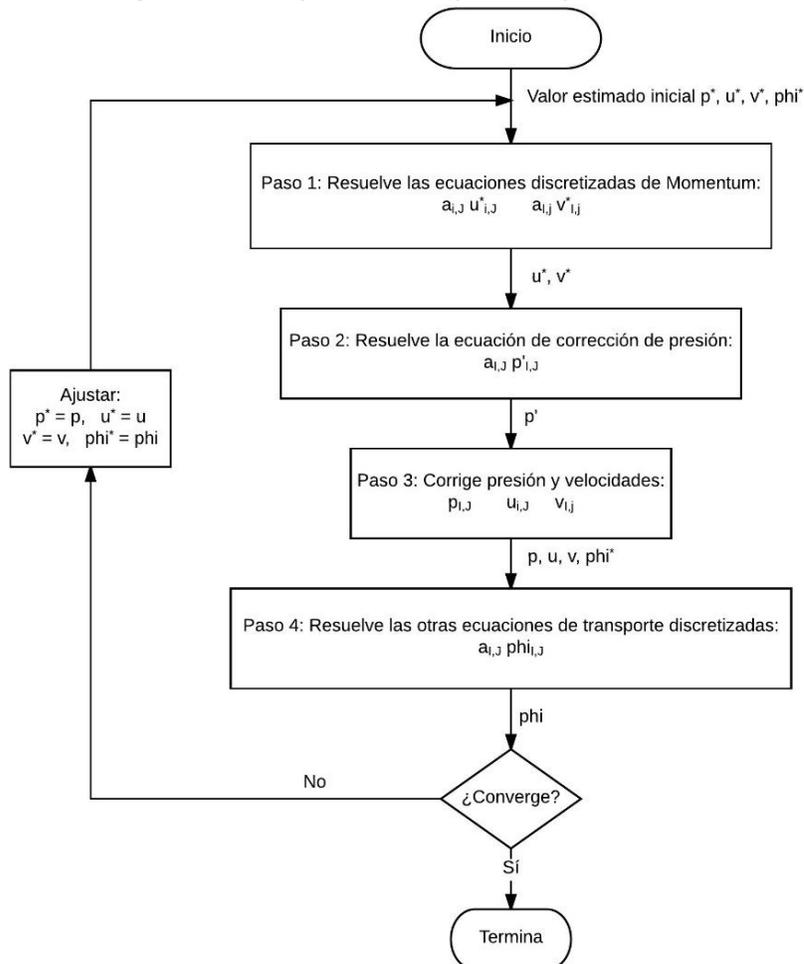
El solver *interPhaseChangeFoam* resuelve las ecuaciones de dos fluidos en casos donde se presenta un cambio de fase usando el método de volumen de fluido (VoF). En este método, las propiedades del fluido son ponderadas por la fracción volumétrica del líquido.

Dentro de cada iteración los tres componentes de la ecuación de Momentum son resueltos sucesivamente en un ciclo. Para esto utiliza el algoritmo PIMPLE, una combinación de PISO y SIMPLE, que resuelve las ecuaciones de campos de presión y velocidad acoplados en flujos estacionarios, donde el ciclo PISO se complementa con una iteración externa.

El algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) fue desarrollado originalmente por Patankar y Spalding en el año 1972 y es un método secuencial que se utiliza sólo con flujos estacionarios, donde inicialmente se ingresa un

valor estimado de presión, que es corregido en cada iteración hasta alcanzar la convergencia.

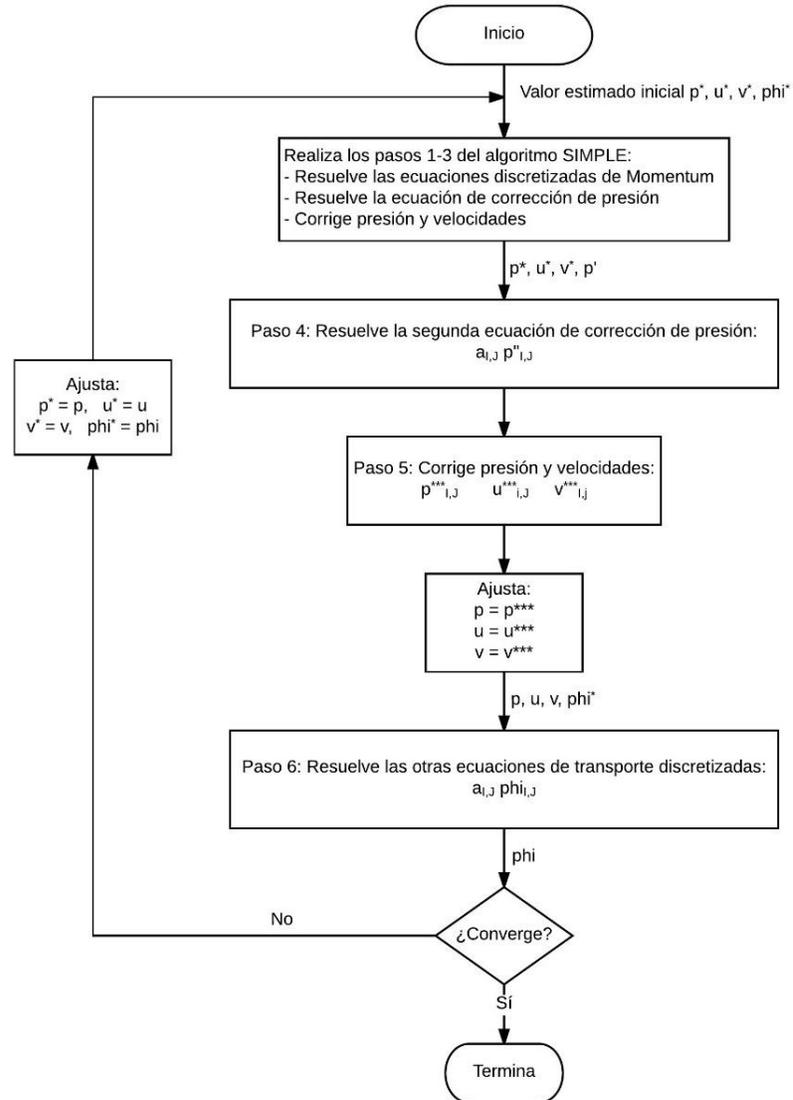
**Figura 15.** Diagrama de flujo del algoritmo SIMPLE.



**Fuente:** Versteeg H. K., Malalasekera W. [7]

El algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) fue desarrollado por Issa en el año 1986, es un procedimiento para el cálculo de presión y velocidad. Inicialmente se utilizaba para el cálculo no iterativo de fluidos compresibles no estacionarios. Posteriormente fue adaptado para la solución iterativa de problemas estacionarios. Suele ser considerado como una extensión del algoritmo SIMPLE, pero incluye un paso predictor y dos pasos correctores para mejorarlo.

**Figura 16.** Diagrama de flujo del algoritmo PISO.



**Fuente:** Versteeg H. K., Malalasekera W. [7]

Debido a la similitud entre las ecuaciones de Navier-Stokes (14.a-c) se introduce una variable general  $\phi$  (phi) para que estas ecuaciones puedan ser escritas como una sola de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi \quad (15)$$

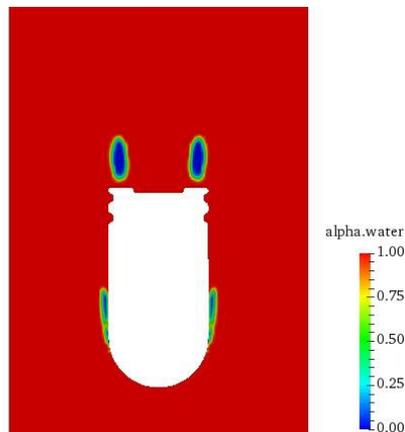
La ecuación (15) es conocida como la ecuación de transporte para  $\phi$ . Del lado izquierdo incluye la tasa de cambio de  $\phi$  más el término convectivo, y del lado derecho el término difusivo ( $\Gamma$  = coeficiente de difusión) más el término fuente.

El solver *interPhaseChangeFoam* utiliza el algoritmo semi-implícito MULES (*Multi-dimensional Universal Limiter for Explicit Solution*) que resuelve una ecuación de transporte sólo convectiva usando un limitador multi-dimensional universal explícito. Finalmente, aplica al mallado el método “scotch” para la descomposición del dominio, combinado con una implementación *OpenMPI* para el procesamiento en paralelo.

### 2.2.3. Análisis de resultados: Post-procesamiento

Para observar los resultados de la simulación de la bala que cavita, se digita el comando `paraFoam` en el terminal. Con esto se abre una herramienta de post-procesamiento llamada *ParaView*. Esta aplicación incluida en OpenFOAM permite la visualización del cambio de fase del agua alrededor de la bala.

**Figura 17.** Vista de la bala,  $V = 20$  m/s;  $t = 0.001$  segundos.



En la figura 17 se muestra la bala al inicio de la simulación. Para visualizarla de esta manera se selecciona el campo “*alpha.water*” luego clic en la opción “*Slice*” y “*Apply*”.

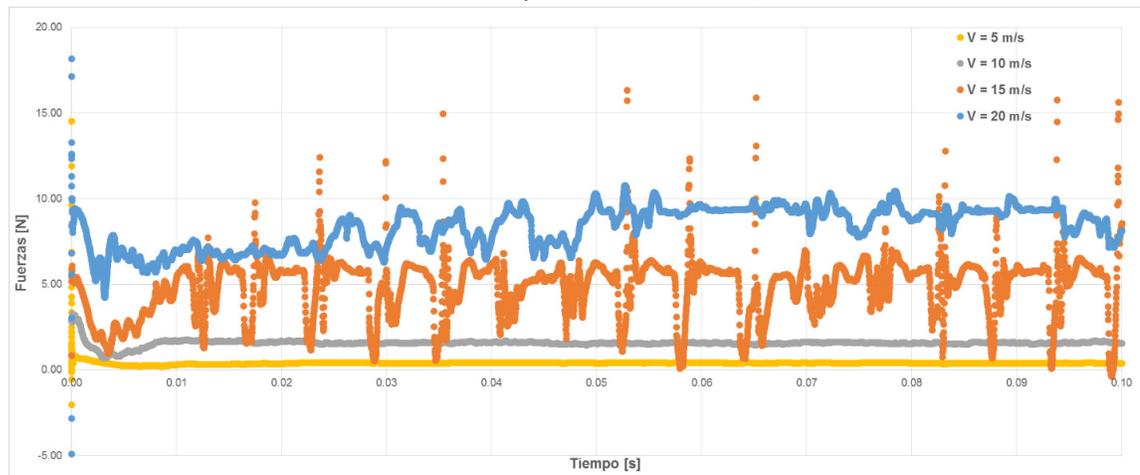
Las zonas azules en la figura 17 corresponden a vapor de agua, el fluido se mueve de abajo hacia arriba a una velocidad de 20 m/s, por lo tanto la formación de burbujas de

vapor se presenta en las zonas donde hay un cambio de sección de la geometría debido a que el fluido pasa a gran velocidad por las aristas de la bala.

Para analizar las fuerzas sobre la bala se configura el archivo **controlDict** para que imprima las fuerzas y los residuales en archivos separados, uno donde se muestran los componentes de las fuerzas y de los momentos debido a la presión, viscosidad y porosidad, y otro donde se muestran los residuales.

En este caso, se ejecutó la simulación variando la velocidad del fluido en el archivo U de la carpeta "0.org": 5, 10, 15 y 20 m/s para analizar la influencia de la presión y la velocidad en la ocurrencia de cavitación, desde  $t = 0$  s hasta  $t = 0.1$  s. En el gráfico 1 se muestra el componente z de las fuerzas debido a la presión sobre la bala para cuatro velocidades.

**Gráfico 1.** Fuerzas de presión en la bala,  $t = 0.0-0.1$  s.

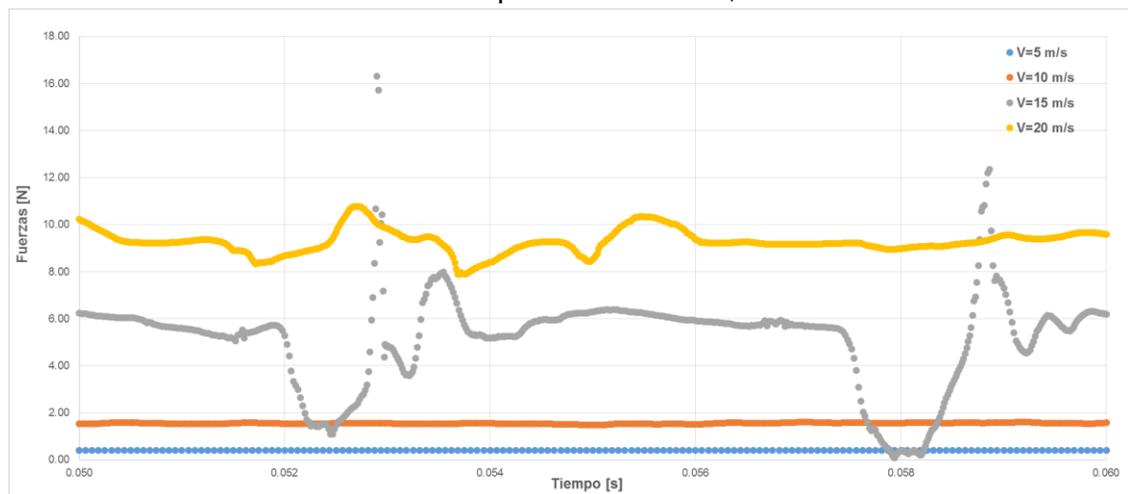


En el gráfico 1, para las velocidades de 5 y 10 m/s, el comportamiento de la fuerza es estable debido a que no hay cavitación. Cuando la velocidad es 15 m/s hay grandes fluctuaciones de fuerza que van desde -0.37 N el mínimo hasta 16.32 N el máximo, y se presenta cavitación de manera inestable como se observa en la figura 18.

Para la velocidad de 20 m/s se presenta cavitación en todo el cuerpo de la bala, ver figura 17. En el gráfico 1, para el caso de 20 m/s la fuerza de presión aún no converge pero se observa mayor estabilidad comparado con la fuerza en 15 m/s.

En el gráfico 1, el máximo y el mínimo de la fuerza para 15 m/s se presentan en el rango de tiempo  $t = 0.05 - 0.06$  segundos, por esto se analiza con más detalle en el gráfico 2.

**Gráfico 2.** Fuerzas de presión en la bala,  $t = 0.05-0.06$  s.



En el gráfico 2 se muestra el componente z de las fuerzas de presión sobre la bala para las respectivas velocidades del fluido, en un tiempo que va desde 0.05 hasta 0.06 segundos. Para visualizar el comportamiento del fluido alrededor de la bala se utiliza la herramienta *ParaView*. En las figuras 18 y 19 se muestra el cambio de fase del fluido alrededor de la bala para las velocidades de 15 y 20 m/s. No se incluyen velocidades menores debido a que no se produce cavitación.

En el tutorial, la velocidad original del fluido corresponde a 20 m/s que es donde se observa la mayor ocurrencia de cavitación. El color azul en las figuras 18 y 19 indica la presencia de burbujas de vapor que rodean el cuerpo de la bala, implosionan en la estela (color verde) y vuelven a su estado líquido (color rojo). Cuando se forma una burbuja que rodea por completo un objeto sumergido ésta reduce el efecto de la fricción y lleva al objeto a desplazarse en el fluido a velocidades cada vez más altas, esto se conoce como

súper cavitación, que es la cavitación llevada al extremo. Las ventajas de este fenómeno son utilizadas en la industria naval y armamentista para darle mayor velocidad a los submarinos y proyectiles.

Para el caso en que la velocidad es 15 m/s se observa un mínimo cambio de fase en el fluido. La estela es muy pequeña y casi no se observa vapor alrededor de la bala.

Analizando el comportamiento de la fuerza para la velocidad de 15 m/s en el gráfico 2 y comparando con las figuras 18 y 19, se observa que donde se presentan los máximos valores de fuerza, en  $t = 0.053$  s y  $t = 0.059$  s, es donde desaparece la burbuja de vapor del cuerpo de la bala.

Por el contrario, donde se presentan los valores mínimos de fuerza, en  $t = 0.052$  s y  $t = 0.058$  s, es donde la burbuja de vapor se vuelve más visible. Esto se debe a que la fuerza depende de la presión sobre la bala. La presión es inversamente proporcional a la ocurrencia de cavitación. A medida que la presión disminuye, aumenta el tamaño de las burbujas de vapor alrededor de la bala.

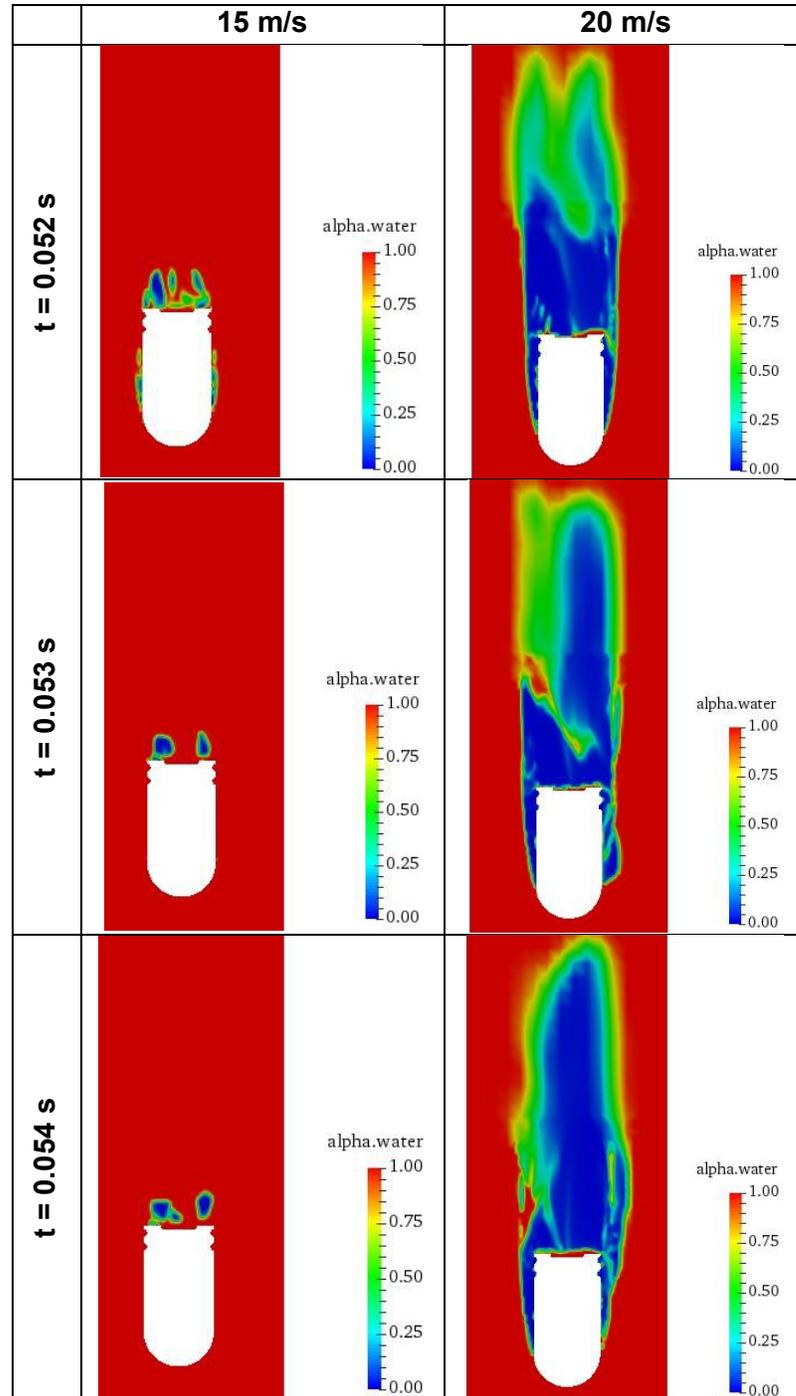
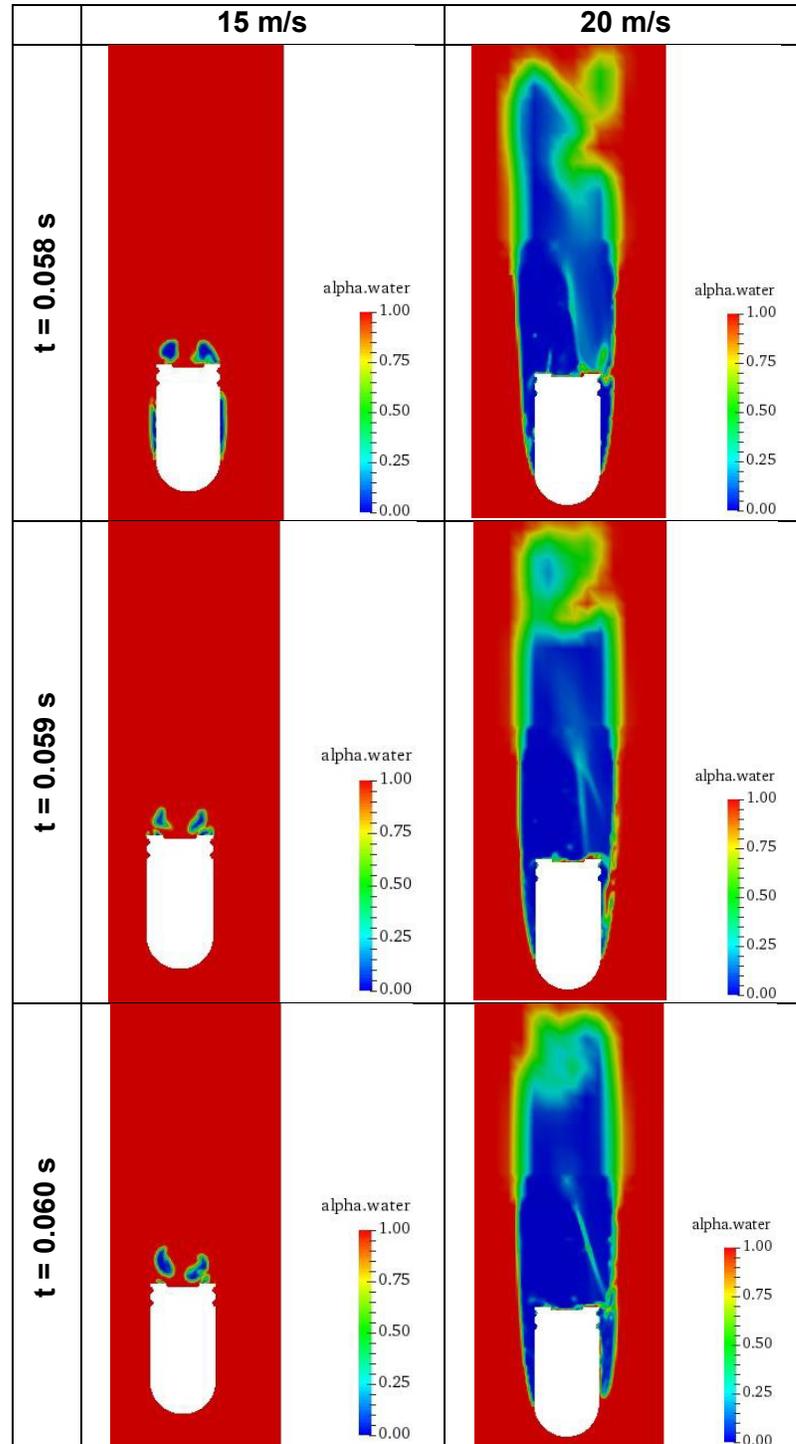
Figura 18. Vistas del campo  $\alpha_{\text{water}}$ ,  $t = 0.052-0.054$  s.

Figura 19. Vistas del campo  $\alpha_{water}$ ,  $t = 0.058-0.060$  s.

En las figuras 20 y 21 se observa el componente z de la velocidad en el mismo espacio de tiempo analizado en las figuras 18 y 19. Como se puede ver detrás de la bala se forman remolinos que desaparecen a menor velocidad. Además, a medida que disminuye la velocidad se observa un decrecimiento de la estela.

**Figura 20.** Vistas del componente z de la velocidad,  $t = 0.052-0.054$  s.

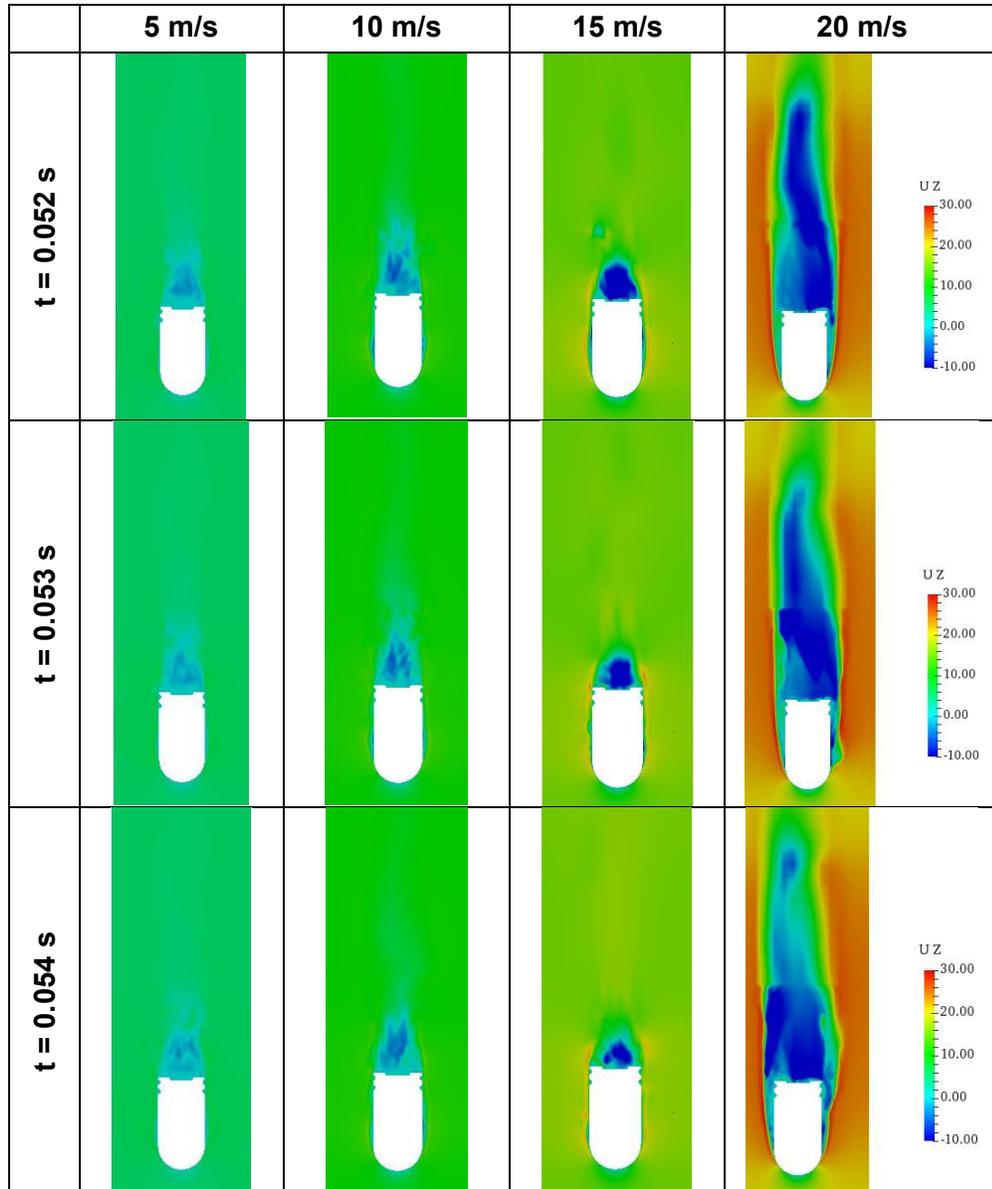
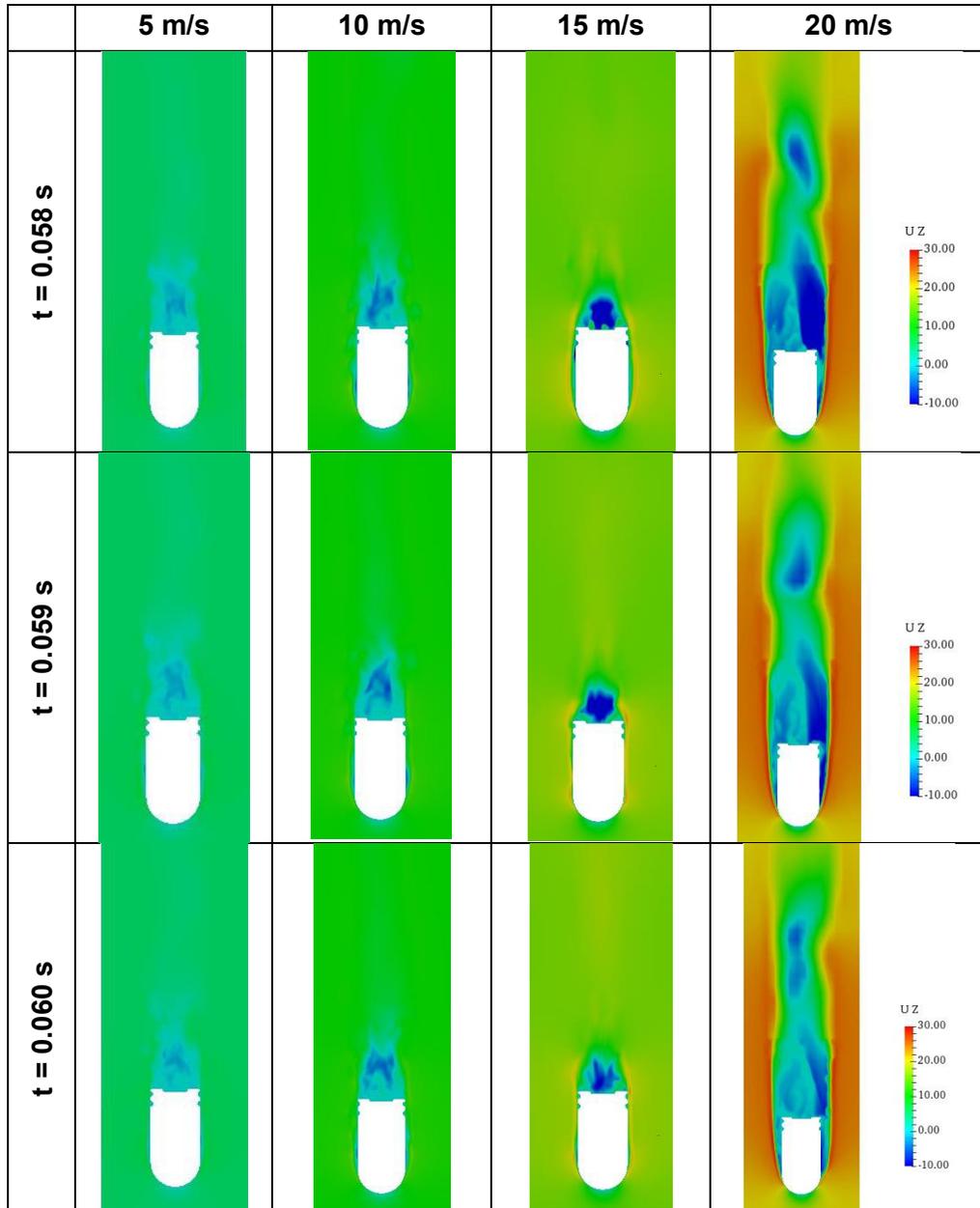


Figura 21. Vistas del componente z de la velocidad,  $t = 0.058-0.060$  s.



### 2.3. Descripción del tutorial “*propeller*”.

Para esta simulación se utiliza el solver *interPhaseChangeDyMFoam* que es similar a lo explicado en el tutorial anterior, donde se presenta un cambio de fase en el fluido, pero en este caso incluye el movimiento de malla.

Este solver trabaja con dos fluidos incompresibles e isotérmicos que no forman una mezcla homogénea y entre los cuales ocurre un cambio de fase. Utiliza el algoritmo de volumen de fluido (*VoF*) con movimiento de malla y cambios topológicos en el mallado. De la “mezcla” de fluidos se obtienen las propiedades y se resuelve una sola ecuación de Momentum. [8]

Para esto, el dominio computacional es dividido en dos regiones, la primera región incluye la entrada y salida del fluido y la pared del túnel; la segunda región es un cilindro pequeño que rodea la hélice. Para habilitar la interpolación entre estas dos regiones OpenFOAM utiliza AMI (*Arbitrary Mesh Interphase*).

#### 2.3.1. Descripción del problema

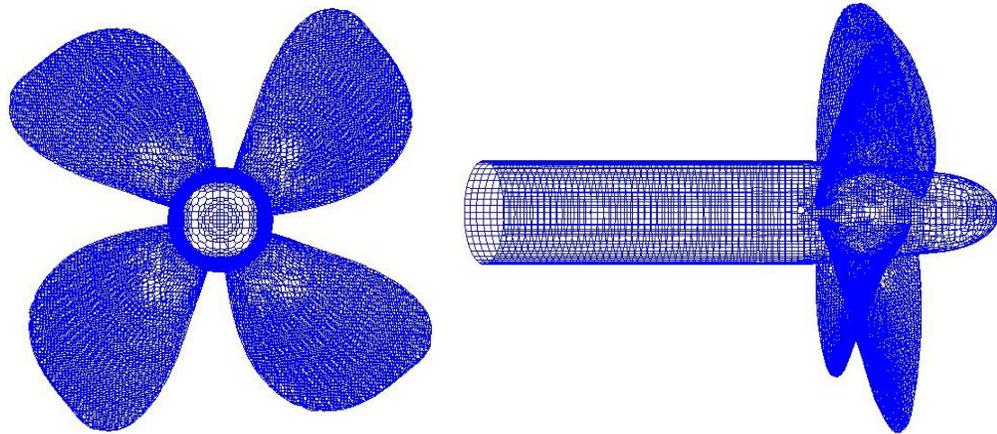
El tutorial “*propeller*” consiste en una hélice de 04 palas que rota en el sentido horario dentro de un túnel cilíndrico lleno de agua en estado líquido. Las dimensiones del túnel y de la hélice se muestran en la tabla 2:

**Tabla 2.** Dimensiones de la hélice y el túnel del tutorial “*propeller*”.

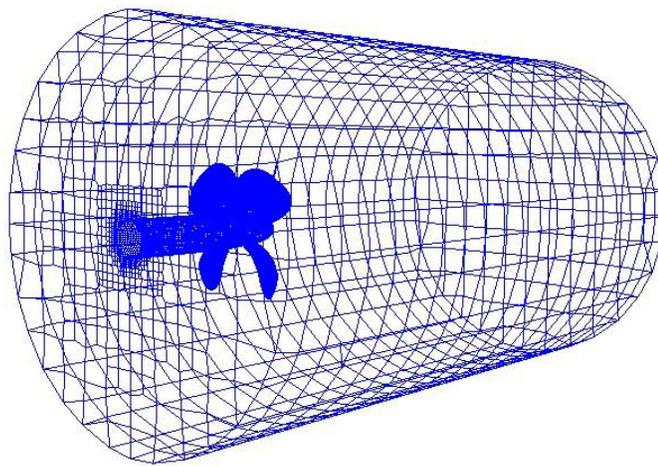
HÉLICE ( <i>propellerTip</i> )		TÚNEL ( <i>outerCylinder</i> )	
Número de palas	04	Longitud	1.00 m
Diámetro de la hélice (D)	0.227 m	Diámetro	0.60 m
Diámetro del eje	0.053 m	Distancia desde (0,0) hasta entrada	0.20 m
Ubicación (centrada)	(0,0,0)	Distancia desde (0,0) hasta salida	0.80 m

Los datos de la tabla 2 fueron extraídos de las geometrías de la hélice y del cilindro externo, que están incluidas en OpenFOAM. Las distancias se pueden expresar en función del diámetro de la hélice  $D$ , por lo tanto el túnel tiene un diámetro de  $2.64D$ , la distancia desde el punto (0,0) hasta la entrada es  $0.88D$ , y hasta la salida es  $3.52D$ .

**Figura 22.** Vistas de la hélice del tutorial “*propeller*”.



**Figura 23.** Vista del túnel y la hélice.



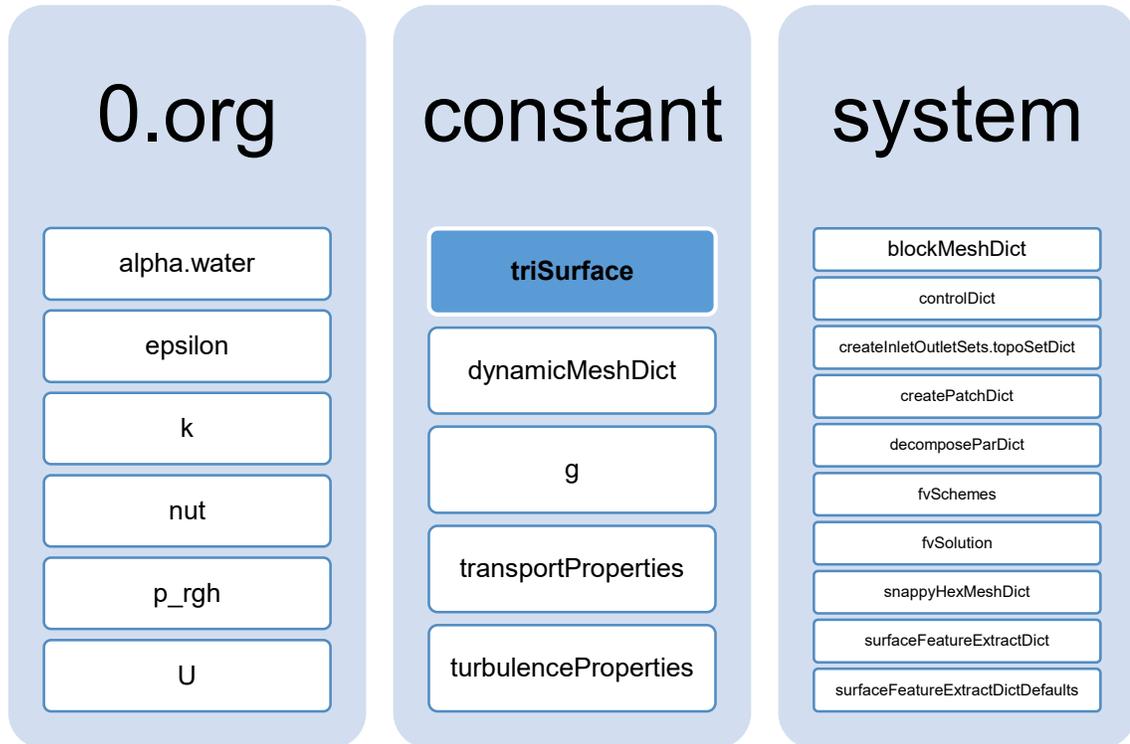
Las figuras 22 y 23 muestran la hélice y el túnel en su mallado original, que fueron obtenidas utilizando la herramienta de post-procesamiento *ParaView*.

En la figura 24 se muestra el directorio del caso, que contiene archivos para configurar el tutorial. La geometría de la hélice se incluye en la carpeta de recursos de OpenFOAM y el tutorial está configurado para copiar este archivo a la carpeta **triSurface**.

A diferencia del directorio del caso anterior, en la carpeta “0.org” del caso “*propeller*” se incluyen además los archivos correspondientes al modelo de turbulencia *k-Epsilon* en los cuales se indica el valor inicial de  $k$  (energía cinética turbulenta), de  $\epsilon$  (tasa de

disipación viscosa) y de  $\nu_{\text{t}}$  (viscosidad turbulenta), sus unidades y las condiciones de frontera para cada región del dominio.

**Figura 24.** Directorio del caso “*propeller*”.



En la carpeta “*constant*” se incluye el archivo **dynamicMeshDict**, que es característico de los tutoriales donde hay un movimiento de malla, en el que se especifica el nombre de la región que rota y su velocidad rotacional en radianes/segundos. Las velocidades del fluido y de la hélice se indican en las tablas 3 y 4.

**Tabla 3.** Velocidad del fluido en la entrada del túnel, dirección “*y*”.

Tiempo [s]	U [m/s]
0	0
0.01	-15
100	-15

**Tabla 4.** Velocidad rotacional de la hélice del tutorial “*propeller*”.

Tiempo [s]	Omega [rad/s]
0	0
0.01	628
0.022	628
0.03	419
100	419

En el archivo **turbulenceProperties** se especifica el modelo de turbulencia k-Epsilon. En el archivo **transportProperties** se indica el modelo de cavitación Schnerr-Sauer, que es similar al tutorial “*cavitatingBullet*”.

La carpeta “*system*” contiene archivos para configurar la simulación:

En **blockMeshDict** se define el dominio computacional, que en este caso se trata de un prisma rectangular de dimensiones 1.02x0.60x0.60 m<sup>3</sup>, con ocho vértices y condiciones de frontera tipo pared (*wall*) para cuatro lados, entrada (*inlet*) y salida (*outlet*) en los extremos, e indica el número de celdas dentro del dominio en las tres dimensiones, en este caso es (12 20 12).

En **controlDict** se configuran las variables de tiempo inicial y final, y en este caso se incluye la herramienta “*function object*” para que las fuerzas y los residuales calculados se impriman en archivos aparte.

En el archivo **controlDict** se especifica la cantidad de iteraciones que realiza el solver, desde  $t = 0$  hasta  $t = 0.1$ , con un  $\Delta t = 0.001$ , es decir 100 iteraciones. Considerando la velocidad rotacional de la hélice indicada en la tabla 4, en 0.1 segundos la hélice da casi 7 vueltas.

En **createInletOutletSets.topoSetDict** se definen las condiciones de frontera del cilindro externo y se define la entrada y salida del fluido.

En **createPatchDict** se crean grupos y se definen las condiciones de frontera para cada uno: *AMI1* y *AMI2* a partir de la geometría del cilindro pequeño que rota alrededor de la hélice, *inlet* y *outlet* a partir del cilindro externo.

En **decomposeParDict** se especifica la cantidad de procesadores que van a desarrollar la simulación para el procesamiento en paralelo. Por defecto se indican 4 procesadores, pero este número se puede cambiar dependiendo de los procesadores que se tengan disponibles.

En **snappyHexMeshDict** se especifican las geometrías y el nivel de refinamiento. Las zonas más cercanas a la hélice tienen un mayor nivel. Esta aplicación genera un mallado tridimensional con celdas tipo hexaedro (hex) o split-hexaedro (split-hex) a partir de superficies con celdas trianguladas en archivos con formato OBJ o STL. Esto quiere decir que refina el mallado y lo adapta a la superficie de la geometría.

**surfaceFeatureExtractDict** extrae y reconoce las características de las geometrías ubicadas en la carpeta *constant/triSurface*, en este caso escribe la geometría del cilindro externo e interno, además del eje y las palas de la hélice.

### 2.3.2. Modelo de Turbulencia

Para este caso se utilizan las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) y el modelo estándar *k-Epsilon*. Este modelo de turbulencia cuenta con dos ecuaciones de transporte adicionales que deben ser resueltas junto con las ecuaciones RANS.

Los modelos de turbulencia que usan las ecuaciones RANS se enfocan en el flujo medio y los efectos de la turbulencia en sus propiedades. Debido a las interacciones entre varias fluctuaciones de la turbulencia aparecen dos términos extra en las ecuaciones de flujo, que son conocidos como ecuaciones de transporte adicionales y forman parte de los modelos de turbulencia clásicos que están disponibles en la mayoría de programas comerciales de CFD.

El modelo estándar *k-Epsilon* (*k* es la energía cinética turbulenta y *Epsilon* es la tasa de disipación viscosa) se enfoca en los mecanismos que afectan la energía cinética turbulenta. Tiene dos ecuaciones modelo, una para *k* y otra para  $\epsilon$ .

La ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta *k* es [9]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k \mathbf{U}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (16)$$

Para la tasa de disipación viscosa  $\varepsilon$  la ecuación es [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (17)$$

Donde  $\mu_t$  es la viscosidad:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (18)$$

$P_b$  es el efecto de la flotabilidad:

$$P_b = \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (19)$$

Donde  $Pr_t$  es el número de Prandtl, y su valor por defecto es 0.85. El coeficiente de expansión térmica es:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (20)$$

Las constantes son [9]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92; C_{3\varepsilon} = -0.33; C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Para describir mejor las ecuaciones 16 y 17, en la figura 25 se explica en palabras cada uno de sus componentes.

**Figura 25.** Componentes de las ecuaciones de  $k$  y  $\varepsilon$ .



**Fuente:** Versteeg H. K., Malalasekera W. [7]

Los valores iniciales para el modelo de turbulencia k-epsilon dependen de la intensidad y de la escala longitudinal de la turbulencia y se calculan de la siguiente manera [9]:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (21)$$

Donde  $U$  es la velocidad de entrada del fluido que en este caso es 15 m/s, el tutorial proporciona el valor de  $k = 0.06 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , por lo tanto, la intensidad de la turbulencia  $I$  para la hélice del tutorial es 1.33%.

$$\varepsilon = 0.09 \frac{k^{3/2}}{l} \quad (22)$$

Donde  $l$  representa la escala longitudinal de la turbulencia en metros, el tutorial proporciona el valor de  $\varepsilon = 0.0495 \text{ m}^2/\text{s}^3$ . Por lo tanto  $l = 0.027 \text{ metros}$ . [9]

### 2.3.3. Convergencia del mallado

Los valores residuales miden la convergencia de una solución iterativa, es decir que cuantifica el error en la solución del sistema de ecuaciones. Mientras más bajo es el residual, más preciso será el resultado.

Por lo general se verifica la convergencia revisando los valores residuales en la carpeta "postProcessing" del directorio del caso, pero hay que tener en cuenta que esto es sólo una parte de lo que se debe hacer para considerar que los resultados son válidos. Para este tipo de simulaciones, la solución debe cumplir las siguientes condiciones [10]:

- Los residuales deben estar reducidos a valores en el orden de  $10^{-4}$  o menos;
- Las variables de interés, fuerzas y momentos en este caso, deben alcanzar valores estables. Es decir que al finalizar la simulación los resultados tengan una tendencia a un mismo valor.

Además, se debe analizar cuál es el tamaño de malla óptimo considerando la mayor convergencia en los resultados y el tiempo de procesamiento de la simulación.

En este caso se utiliza un computador con las siguientes características:

**Tabla 5.** Características del computador.

<b>Marca</b>	DELL Precision T7610
<b>Software</b>	Red Hat Enterprise Linux Workstation 7.2
<b>Memoria</b>	31.2 GB
<b>Procesador</b>	Intel ® Xeon(R) CPU E5-2630 v2 @ 2.60 GHz x 24
<b>Tipo OS</b>	64 bit
<b>Gráficos</b>	Quadro K4000/PCIe/SSE2
<b>GNOME</b>	Versión 3.14.2

Para determinar el nivel de refinamiento adecuado se ejecutó el tutorial con tres mallados diferentes, modificando el archivo **blockMeshDict**, con la misma cantidad de procesadores, manteniendo sin cambios las otras variables del tutorial original.

En este archivo se indica que el dominio se divide en 12 partes en el eje “x”, 20 partes en el eje “y” y 12 partes en el eje “z”. Por lo tanto, se utilizó la malla original (12 20 12), y luego se modificó el archivo para la malla media (24 40 24) y para la malla fina (36 60 36), ver figuras 26, 27 y 28.

En la tabla 6 se describe el tipo de malla, la cantidad de celdas y el tiempo que tardó en resolver con 08 procesadores. Esto se hizo debido a las limitaciones de tiempo y de los recursos computacionales disponibles, y considerando el estudio de convergencia realizado anteriormente [6].

Cuando se utilizan muchos procesadores el sistema requiere de mayor tiempo para compartir información entre ellos, para resolver las ecuaciones y finalmente para reconstruir en paralelo. Esto incrementa el tiempo total de resolución.

**Tabla 6.** Tipos de mallado en el estudio de convergencia.

<b>Malla</b>	<b>Cantidad de celdas</b>	<b>Tiempo aproximado en resolver con 08 procesadores</b>
Gruesa (original)	525,586	11.5 horas (0.5 días)
Media (x2)	1,938,918	111 horas (4.6 días)
Fina (x3)	2,497,092	315.5 horas (13.2 días)

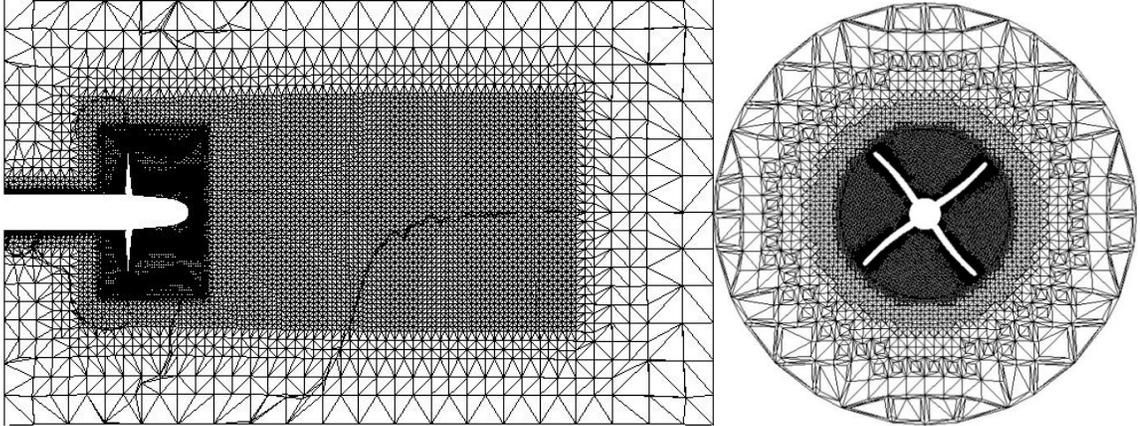
Las figuras 26, 27 y 28 muestran cortes transversales y longitudinales del dominio del tutorial “*propeller*” de acuerdo al tipo de malla especificado en **blockMeshDict**, estas imágenes fueron generadas en *ParaView*.

Se observa en las figuras 26, 27 y 28 que, aunque el tamaño de las celdas disminuye en todo el dominio, *snappyHexMesh* hace énfasis en el refinamiento alrededor de la superficie de la hélice y del eje propulsor, de manera que las celdas son más pequeñas en esa zona y se adaptan mejor a la geometría de la hélice.

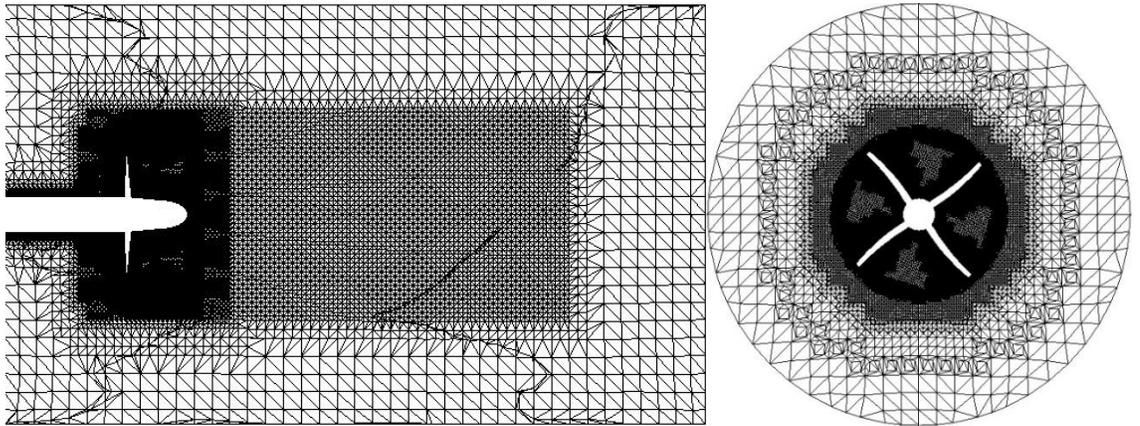
En las figuras 29, 30 y 31 se muestra la hélice con los tres tipos de discretización. En la malla más gruesa las palas de la hélice presentan rugosidades en los bordes y en la tapa del eje. Estas imperfecciones no se observan cuando la malla es más fina.

Esto explica el incremento del tiempo de resolución cuando se utilizan mallas más finas, puesto que se deben resolver las ecuaciones de un mayor número de elementos, por lo tanto se espera que el resultado de la malla más fina sea el más preciso.

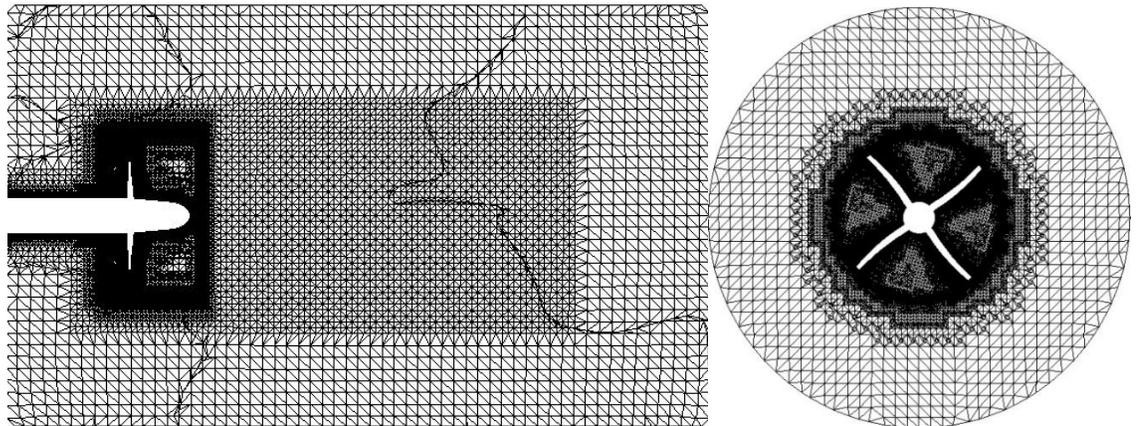
**Figura 26.** Corte longitudinal y transversal con malla gruesa.



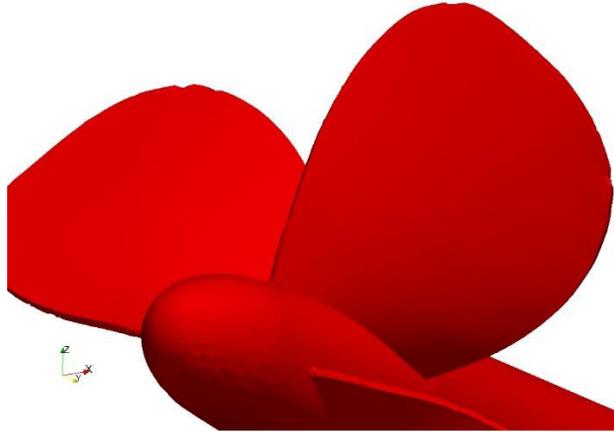
**Figura 27.** Corte longitudinal y transversal con malla media.



**Figura 28.** Corte longitudinal y transversal con malla fina.



**Figura 29.** Vista de la hélice con malla gruesa.



**Figura 30.** Vista de la hélice con malla media.



**Figura 31.** Vista de la hélice con malla fina.



### 2.3.4. Análisis de resultados: Post-procesamiento

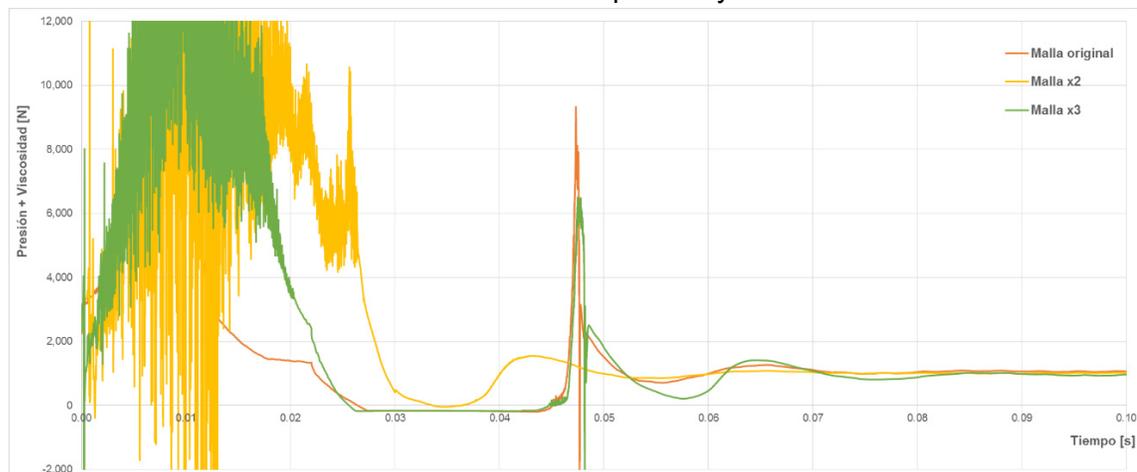
La hélice del tutorial “*propeller*” gira en sentido horario alrededor del eje propulsor que sigue la dirección del eje “y”, siendo positivo hacia proa.

La modificación realizada en el archivo **controlDict** permite graficar Fuerzas y Momentum debido a la presión y a la viscosidad sobre la hélice calculadas en cada iteración.

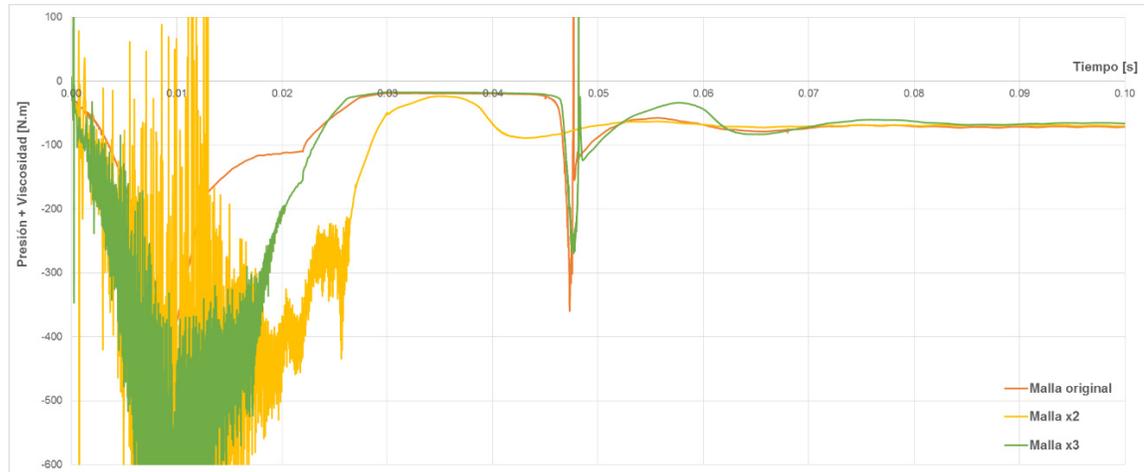
En el gráfico 3 se muestra para cada malla la resultante de la suma de la componente “y” de las fuerzas de presión y viscosidad, versus el tiempo en segundos. La contribución de la fuerza debido a la viscosidad es mínima por lo tanto la resultante es casi igual a la fuerza debido a la presión.

Se observa una gran fluctuación de presión cuando el tiempo es menor a 0.03 segundos, que es cuando cambian las velocidades del fluido y de la hélice como se indicó en las tablas 3 y 4, además esto se debe a inestabilidades numéricas. Desde  $t=0.028$  hasta  $t=0.044$  la resultante es negativa por lo tanto se espera que se presente cavitación. En  $t=0.045$  hasta  $t=0.048$  se observa una gran fluctuación de la resultante en la malla original y en la malla más fina.

**Gráfico 3.** Fuerzas sobre la hélice debido a presión y viscosidad en las tres mallas.



**Gráfico 4.** Momentum sobre la hélice debido a presión y viscosidad en las tres mallas.



El gráfico 4 muestra el Momentum debido a la presión y la viscosidad para los tres tipos de malla. Se observa el mismo comportamiento que los gráficos de fuerzas, con fluctuaciones en los mismos espacios de tiempo. Igual que con las fuerzas, se observa convergencia a partir de  $t = 0.08$  s.

La figura 32 muestra un corte longitudinal del dominio obtenido con la herramienta *ParaView*, desde  $t = 0.033$  hasta  $t = 0.036$  segundos, mientras se produce cavitación en los tres mallados. El indicador **alpha.water** es la fracción volumétrica del líquido, que es igual a 1 cuando todo es líquido e igual a 0 cuando todo es vapor. Esto coincide con las fuerzas resultantes presentadas en el gráfico 3 donde se observa que la fuerza debido a la presión es negativa en ese mismo lapso de tiempo.

En la tabla 7 se muestran los resultados numéricos del empuje y torque para las tres mallas. Para obtener el empuje y el torque se calcula el promedio desde  $t=0.08$  hasta  $t=0.1$  s, porque en ese tiempo se observa convergencia en los resultados.

Se observa que las fuerzas y Momentum disminuyen en un 5-6% a medida que se refina la malla lo cual podría ser debido a que se necesitaba dejar la simulación por más tiempo para alcanzar mayor convergencia, o debido a que se necesitaba refinar más la malla.

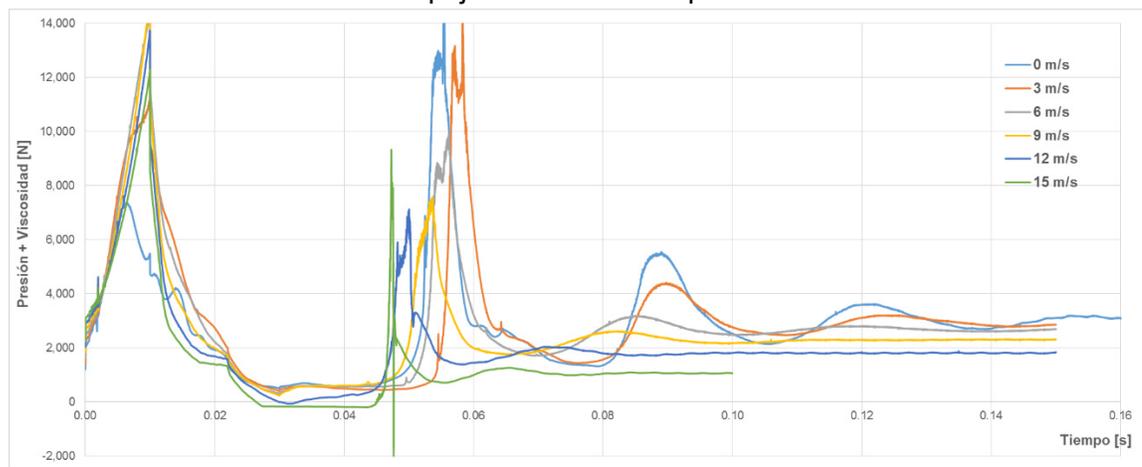
Se recomienda hacer simulaciones con mallas más finas y durante un tiempo mayor a 0.1 segundos para observar si el resultado continúa disminuyendo.

**Tabla 7.** Resultados de fuerzas y Momentum para las tres mallas.

OpenFOAM – <i>propellerTip</i>				
Malla	Empuje, T [N]	Desv. Estándar	Torque, Q [N.m]	Desv. Estándar
Original	1066.27	1.19%	71.59	0.74%
Media (x2)	1007.77	0.75%	69.32	0.51%
Fina (x3)	967.03	3.24%	66.48	1.88%

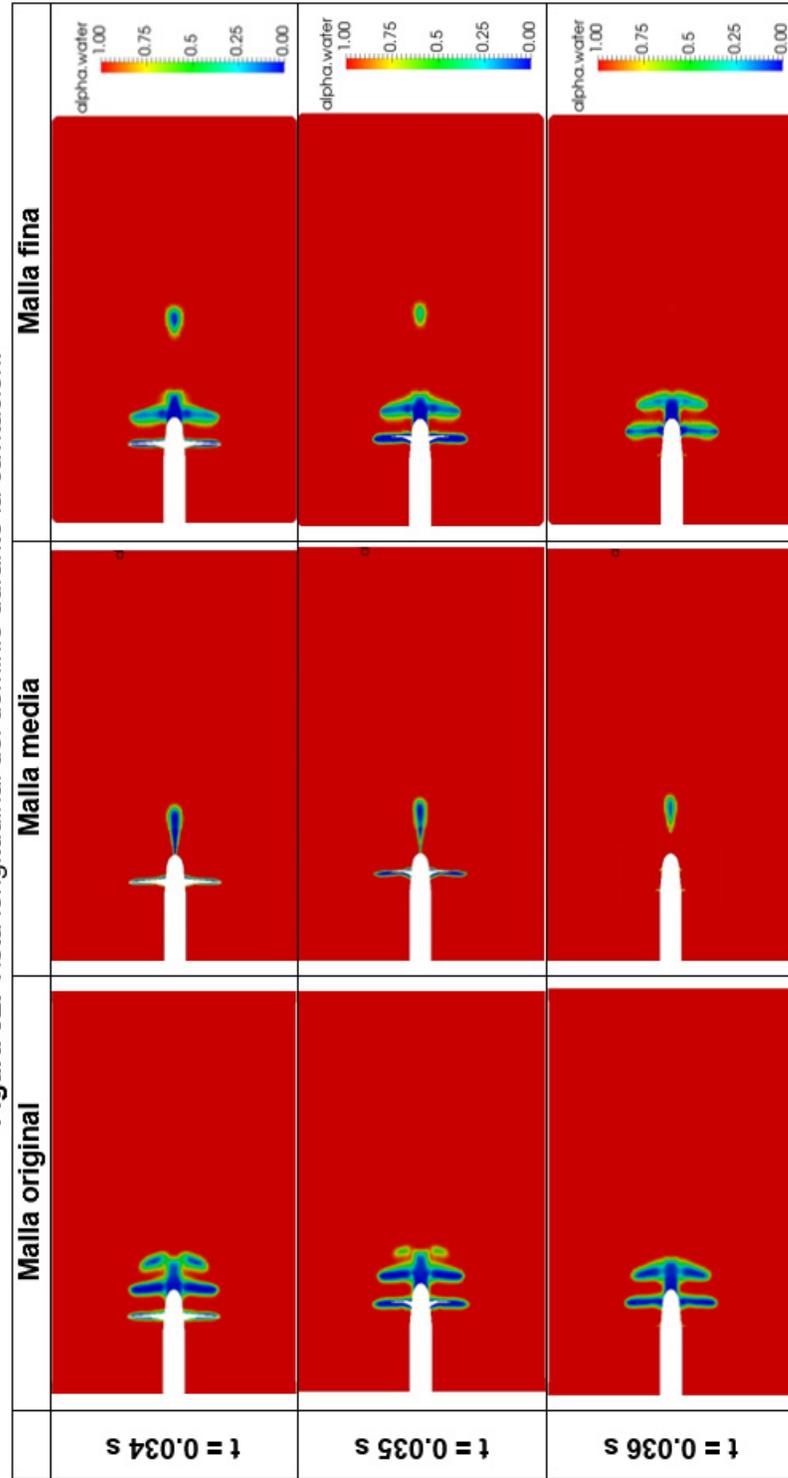
Además se realizaron simulaciones con la malla original y a diferentes velocidades del fluido para formar el gráfico de los coeficientes adimensionales de la hélice. En el gráfico 5 se muestra el comportamiento de las fuerzas para cada velocidad.

**Gráfico 5.** Fuerza de empuje sobre la hélice para diferentes velocidades.



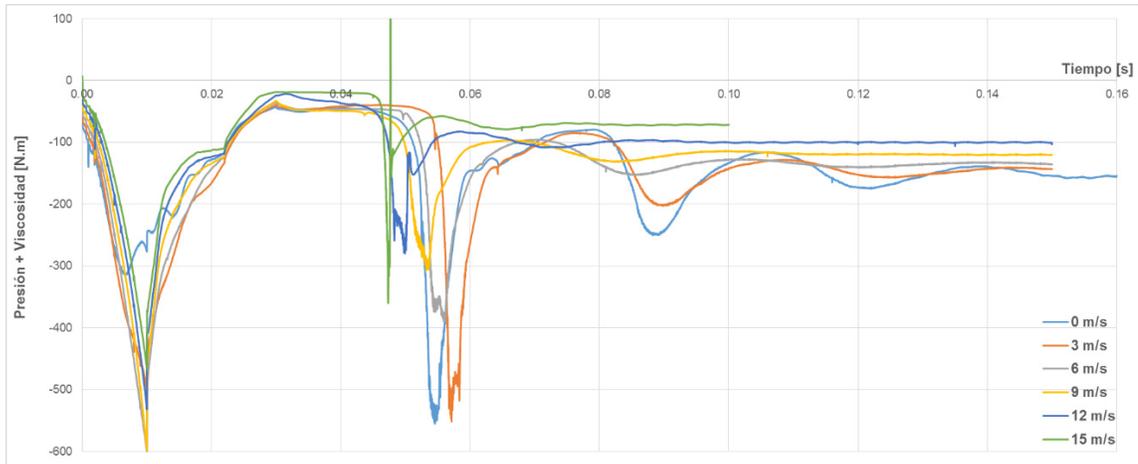
Analizando el gráfico 5, podemos deducir que a mayor velocidad del fluido la convergencia se alcanza más rápido. Con la velocidad de 15 m/s la fuerza converge en  $t=0.08$  s, mientras que para las velocidades de 0 y 3 m/s en  $t=0.15$  segundos aún no se ha alcanzado convergencia. Esto se debe a que si la velocidad del fluido es muy baja, la hélice necesita dar más vueltas hasta alcanzar estabilidad por lo tanto realiza un esfuerzo mayor. Por esto también las fuerzas de empuje resultantes son mayores a menor velocidad.

**Figura 32.** Vista longitudinal del dominio durante la cavitación.



En el gráfico 6 se observa el torque debido a la presión y la viscosidad con un comportamiento similar al de las fuerzas de empuje, que a mayor velocidad alcanza estabilidad más rápido.

**Gráfico 6.** Momentum sobre la hélice para diferentes velocidades.



Además se debe considerar que el solver *interPhaseChangeDyMFoam* fue desarrollado para resolver las ecuaciones del fluido en casos donde se presenta un cambio de fase, y al disminuir la velocidad del fluido no se produce cavitación.

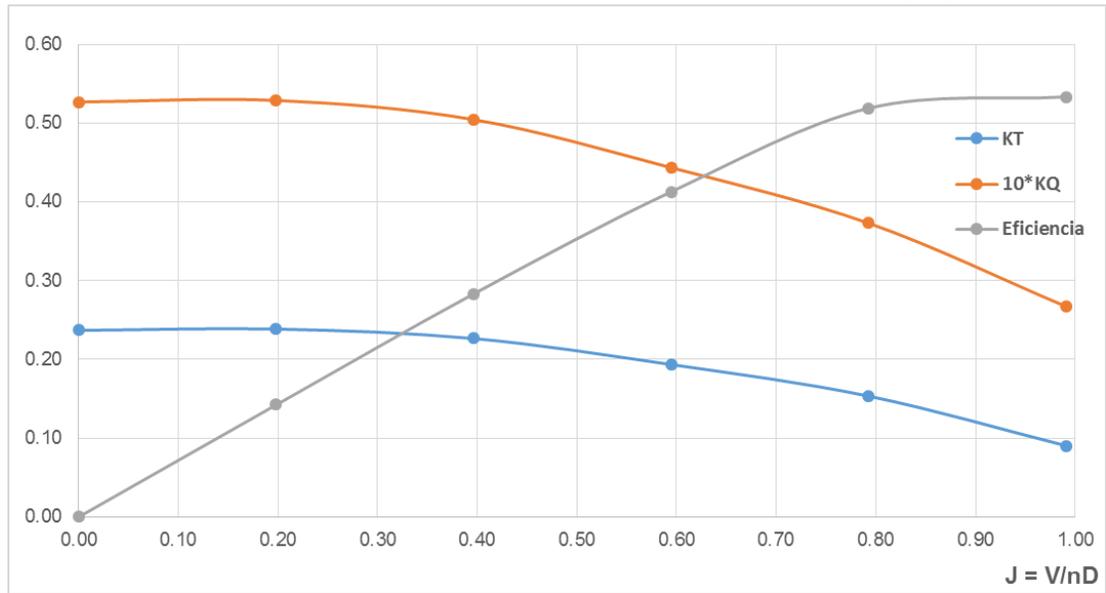
A continuación en la tabla 8 se muestran los resultados numéricos de empuje y torque obtenidos para cada velocidad, y los coeficientes adimensionales calculados con las ecuaciones (7), (8), (9) y (10) presentadas en la sección 1.6:

**Tabla 8.** Coeficientes adimensionales para diferentes velocidades de entrada.

J	$V_A$	Empuje, T [N]	$K_T$	Torque, Q [N.m]	$K_Q$	$10 \cdot K_Q$	Eficiencia
0	0.00	2795.82	0.2368	141.18	0.0527	0.527	0.00
0.198	3.00	2815.18	0.2384	141.73	0.0529	0.529	0.14
0.396	6.00	2673.65	0.2264	135.21	0.0504	0.504	0.28
0.595	9.00	2283.63	0.1934	118.84	0.0443	0.443	0.41
0.793	12.00	1810.49	0.1533	99.94	0.0373	0.373	0.52
0.991	15.00	1066.27	0.0903	71.59	0.0267	0.267	0.53

Estos resultados se muestran en el gráfico 7, donde se observa un comportamiento típico de los gráficos que caracterizan una hélice marina.

**Gráfico 7.** Coeficientes adimensionales de la hélice del tutorial “propeller”.



No se pudo realizar una validación con estos resultados debido a que no se tiene información experimental de la hélice utilizada en el tutorial. Por esta razón se decidió utilizar la geometría de la hélice INSEAN E779A.

## CAPÍTULO 3

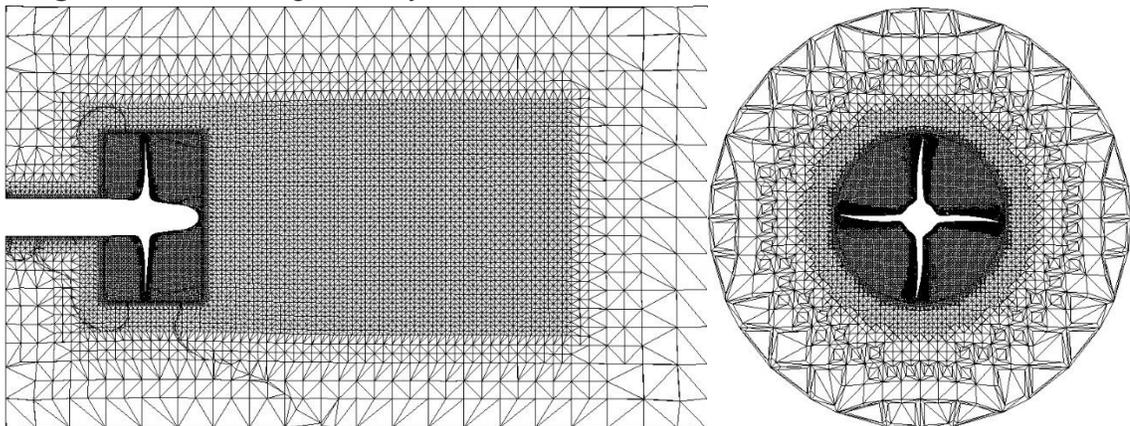
En este capítulo se describe la simulación utilizando la hélice modelo INSEAN E779A y se presentan resultados en aguas abiertas. Finalmente se visualizan las zonas de cavitación en dicho propulsor.

### 3.1. Discretización del dominio computacional

La discretización del mallado involucra la división del dominio computacional en regiones pequeñas o celdas que pueden tomar la forma de triángulos, rectángulos, tetraedros y hexaedros.

Posterior a esta división el software realiza la discretización de las ecuaciones gobernantes en base al mallado ya establecido. Para esto OpenFOAM utiliza el Método de Volumen Finito, donde las celdas son consideradas volúmenes de control y la variable de interés se ubica en su centroide. Luego se integran las ecuaciones gobernantes en su forma diferencial sobre cada volumen de control lo que da como resultante la ecuación discretizada, la cual expresa el principio de conservación para la variable que está dentro del volumen de control.

**Figura 32.** Corte longitudinal y transversal del mallado de la hélice INSEAN E779A.



Para realizar las simulaciones de la hélice INSEAN E779A se utilizó el mallado original del tutorial “*propeller*” especificado en el archivo **blockMeshDict** (12 24 12) debido a que se presentaban inconvenientes con la simulación cuando se realizaba un refinamiento de la malla y debido a las limitaciones de tiempo y de recursos computacionales considerando la cantidad de simulaciones que se debían hacer, ya que solo se disponía de 24 procesadores, ver tabla 5.

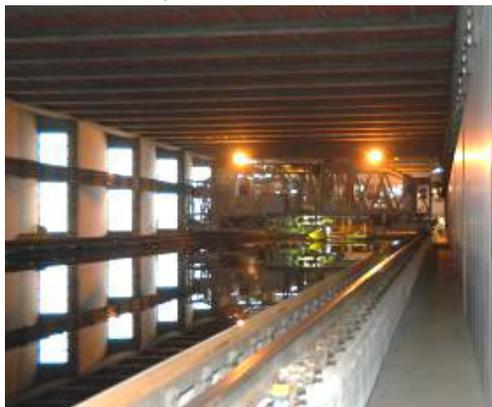
Antes de ejecutar las simulaciones se ingresó la geometría de la hélice INSEAN E779A en formato \*.STL y se utilizó el mismo eje del tutorial original. Además, se modificó el diámetro del eje en el extremo de la hélice INSEAN E779A (51 mm) para que coincida con el eje del tutorial (53 mm), ver figura 33.

### 3.2. Descripción de condiciones iniciales y condiciones de frontera

Antes de ejecutar la simulación con la hélice INSEAN se debe configurar el tutorial “*propeller*”, para que las condiciones iniciales y de frontera simulen el experimento realizado en el tanque de arrastre.

Los datos experimentales proporcionados por INSEAN fueron obtenidos en el tanque de arrastre #2 del CEIMM, cuyas dimensiones son: longitud = 220.00 metros, ancho = 9.00 metros y profundidad de agua = 3.50 metros, el carro alcanza una velocidad máxima de 10 m/s y el rango de velocidad rotacional es de 60 a 3000 RPM.

**Figura 33.** Tanque de arrastre #2 del CEIMM.



**Fuente:** [www.insean.cnr.it](http://www.insean.cnr.it)

La hélice modelo es montada en la parte frontal de un eje conectado a un dinamómetro, y en conjunto son desplazados por el carro de arrastre, sumergidos de manera paralela a la superficie del agua en calma.

La velocidad de avance  $V_A$  está definida por la velocidad del carro de arrastre, los valores de empuje  $T$  y torque  $Q$  son obtenidos por el dinamómetro y la velocidad de rotación  $n$  es medida por un tacómetro. Las pruebas se realizan manteniendo constante la velocidad de rotación y variando la velocidad de avance.

En OpenFOAM se realizaron seis simulaciones utilizando la hélice INSEAN E779A, variando la velocidad de entrada, con lo que varía el coeficiente de avance, los valores numéricos de empuje y torque fueron no-dimensionalizados y comparados con los datos experimentales.

En la carpeta "0.orig" se modifican los archivos **k** y **epsilon**, que contienen los valores iniciales para el modelo de turbulencia k-epsilon. En este caso se asume una intensidad de turbulencia del 2% que corresponde al máximo porcentaje durante la prueba reportado en la publicación de INSEAN [11]; y la escala longitudinal se asume como 0.027 metros igual a la del tutorial considerando que las dos hélices tienen el mismo diámetro.

El archivo **U** se modifica en cada simulación, indicando la velocidad a la que ingresa el fluido. A partir de las ecuaciones 21 y 22 se obtienen valores iniciales de k y epsilon para las diferentes velocidades del fluido, como se indica en la tabla 9:

**Tabla 9.** Valores iniciales para el modelo de turbulencia.

Velocidad [m/s]	k [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Épsilon [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
0.00	0	0
0.40	9.56E-05	3.15E-06
0.80	3.83E-04	2.52E-05
1.60	1.53E-03	2.02E-04
2.40	3.45E-03	6.83E-04
2.80	4.70E-03	1.09E-03

En la carpeta “constant” se modifica el archivo **dynamicMeshDict** para configurar la velocidad rotacional de la hélice INSEAN, tal como se indica en la tabla 10:

**Tabla 10.** Velocidad rotacional de la hélice INSEAN.

Tiempo [s]	Omega [rad/s]
0	0
0.05	111.105
0.11	111.105
0.15	74.07
100	74.07

En el archivo **g** se incluye la gravedad -9.8 en el eje z, ya que las pruebas se realizaron en un tanque de arrastre. Para pruebas en túneles de cavitación no se considera la influencia de la gravedad.

En el archivo **transportProperties** se configuran las propiedades de los fluidos, agua y vapor como se indica en la tabla 11, y se especifica el modelo de cavitación a utilizar, que en este caso es el modelo de Schnerr-Sauer.

**Tabla 11.** Características del agua y del vapor.

<b>Presión de saturación del agua</b>	2300 Pa
<b>Tensión superficial entre dos fases</b>	0.07 N/m
<b>Temperatura del agua</b>	16 °C
<b>Viscosidad cinemática del agua</b>	1.11E-06 m <sup>2</sup> /s
<b>Densidad del agua</b>	1000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad cinemática del vapor</b>	4.27E-04 m <sup>2</sup> /s
<b>Densidad del vapor</b>	0.01355 kg/m <sup>3</sup>

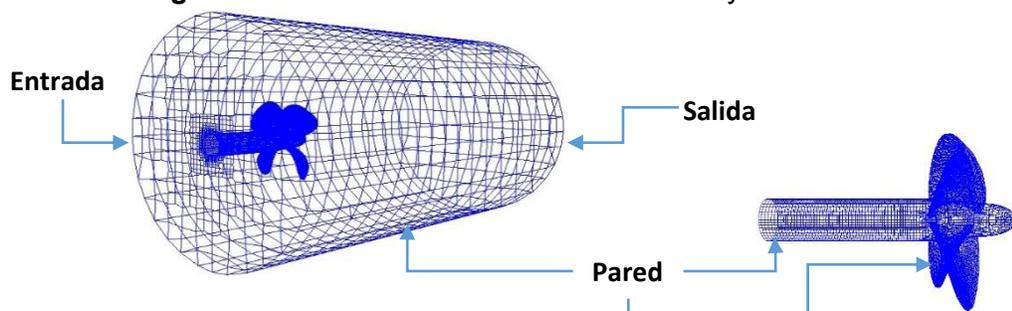
En la carpeta **triSurface** dentro de la carpeta “constant” se copia la geometría de la hélice en formato tipo \*.STL o tipo \*.OBJ. Se debe tener en cuenta que cualquier cambio que se haga en el nombre de la geometría debe ser modificado en todos los archivos correspondientes.

En la carpeta “system” se modifica el archivo **controlDict** para que imprima los resultados de fuerzas, torque y residuales en archivos de texto. Además se modifica el tiempo final “endTime” igual a 0.5 para observar convergencia en los resultados.

Debido a que se presentaron problemas de convergencia, en el archivo **fvSolution** se modifica el valor de “nCorrectors” igual a 2, para que en cada iteración el algoritmo PIMPLE resuelva dos veces la ecuación de presión y el corrector de Momentum.

Además, es necesario definir las condiciones de frontera de cada sección del túnel. La entrada del túnel es “inlet”, la salida es “outlet”, el cilindro externo, la hélice y el eje son considerados como pared “wall”. A partir de esta información se muestra en la tabla 12 las condiciones de frontera:

**Figura 34.** Condiciones de frontera del túnel y la hélice.



**Tabla 12.** Condiciones de frontera para cada sección del túnel.

Sección	alpha.water	epsilon	k	p_rgh	U
Inlet	fixedValue	fixedValue	fixedValue	fixedFluxPressure	uniformFixedValue
Outlet	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
Shaft	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	fixedFluxPressure	noSlip
outerCylinder	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	fixedFluxPressure	noSlip
Propeller	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	fixedFluxPressure	movingWallVelocity

El valor inicial de “alpha.water” es 1 y el valor de la presión “p\_rgh” es 1E5 Pascales que es la presión atmosférica.

### 3.3. Resultados en aguas abiertas

Se realizaron las simulaciones con seis velocidades diferentes hasta  $t = 0.5$  segundos y se obtuvo la fuerza de empuje y torque para cada velocidad presentados en la tabla 13, donde se comparan con las fuerzas de empuje y torque proporcionados por INSEAN:

**Tabla 13.** Resultados de empuje y torque experimentales y de CFD.

V [m/s]	INSEAN		OpenFOAM	
	Empuje [N]	Torque [N.m]	Empuje [N]	Torque [N.m]
0.00	197.70	7.34	75.31	6.19
0.40	182.12	6.74	118.98	4.41
0.80	159.50	5.96	137.52	3.39
1.60	108.31	4.27	14.22	7.81
2.40	55.64	2.48	-180.49	14.75
2.80	26.71	1.48	-289.98	18.55

Para obtener estos valores se suman los resultados de presión y de viscosidad en el eje “y” y se grafica para observar si hay convergencia. Luego se calcula el promedio de los últimos valores, en este caso desde  $t=0.4$  hasta  $t=0.5$  segundos.

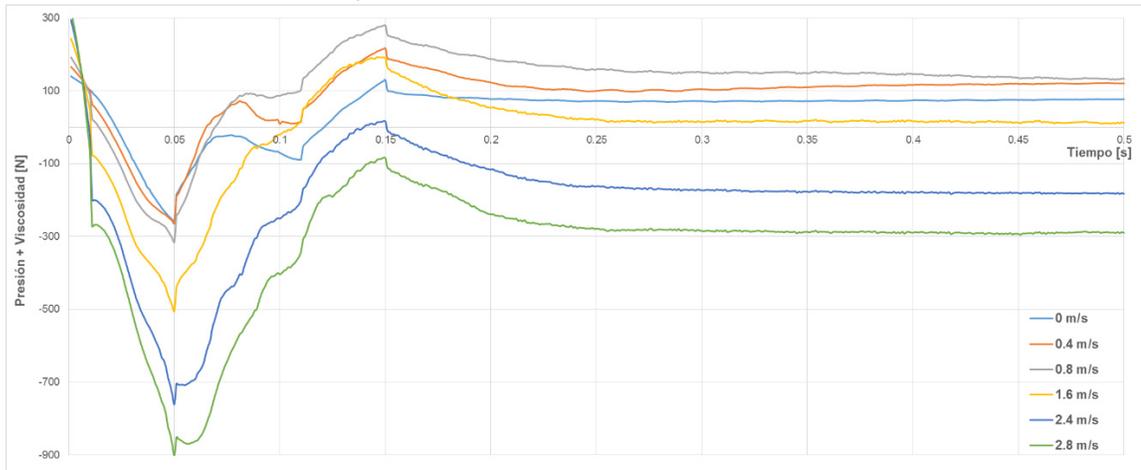
A partir de estos resultados se obtienen los coeficientes adimensionales de avance J, de empuje  $K_T$  y de torque  $K_Q$  que se comparan con los de la hélice modelo INSEAN E779A como se muestran en la tabla 14:

**Tabla 14.** Valores de  $K_T$  y  $K_Q$  experimentales y de CFD.

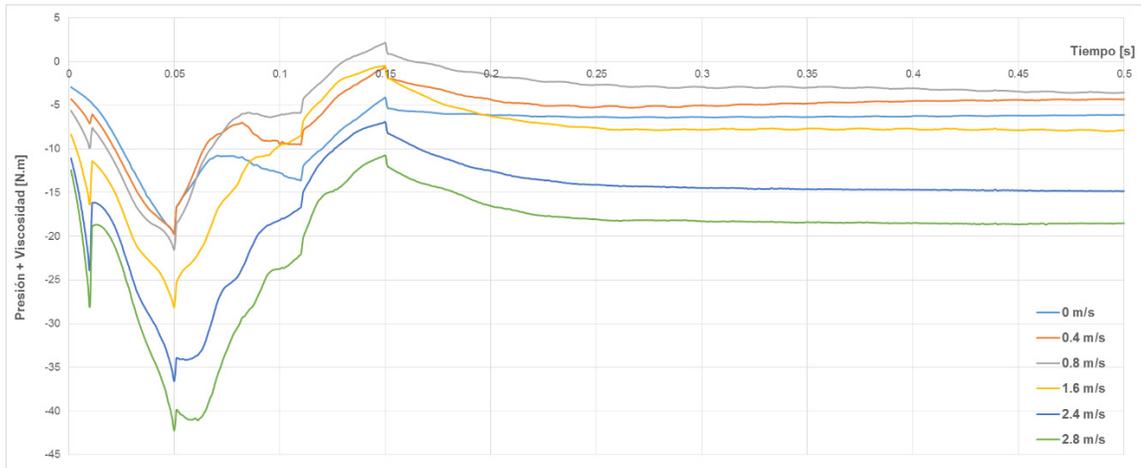
J	INSEAN		OpenFOAM	
	$K_T$	$10 \cdot K_Q$	$K_T$	$10 \cdot K_Q$
0	0.533	0.871	0.203	0.734
0.149	0.491	0.8	0.321	0.523
0.298	0.43	0.707	0.371	0.402
0.596	0.292	0.506	0.038	0.926
0.895	0.15	0.294	-0.487	1.749
1.045	0.072	0.176	-0.782	2.200

En los gráficos 8 y 9 se muestran las fuerzas de empuje y torque para diferentes velocidades del fluido que fueron generados por OpenFOAM. Para obtener los resultados se calcula el promedio de los valores entre 0.4 y 0.5 segundos. Estos resultados se resumen en la tabla 13 y se comparan con los obtenidos de manera experimental en el laboratorio de INSEAN.

**Gráfico 8.** Fuerza de empuje de la hélice INSEAN para diferentes velocidades del fluido.



**Gráfico 9.** Torque sobre la hélice INSEAN para diferentes velocidades del fluido.

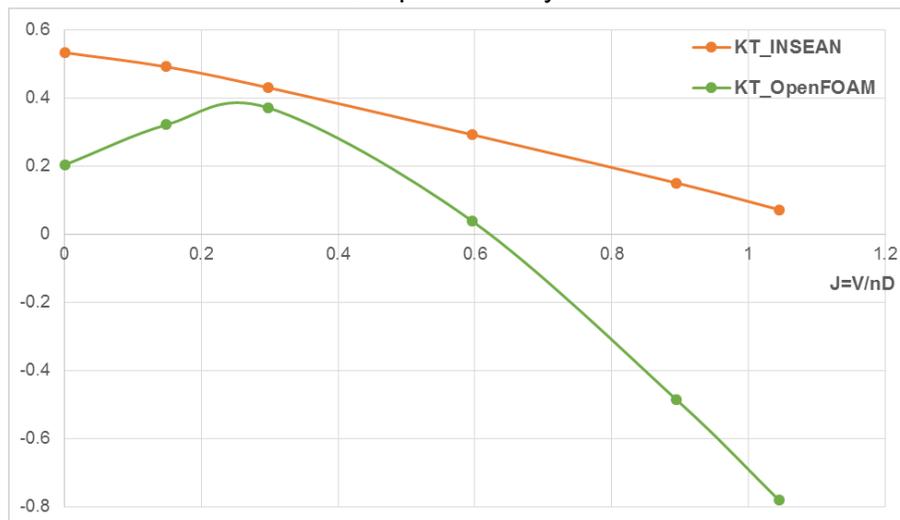


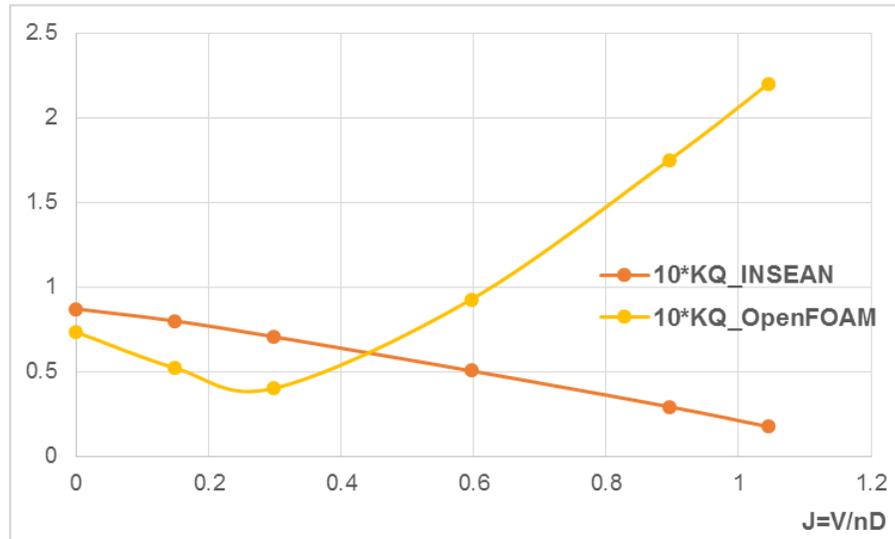
A continuación, en los gráficos 10 y 11 se observa una gran diferencia entre los resultados obtenidos en OpenFOAM y los resultados obtenidos en el laboratorio de INSEAN.

Se debe considerar que estos resultados pertenecen a la hélice funcionando en aguas abiertas a bajas velocidades y el solver *interPhaseChangeDyMFoam* fue desarrollado para resolver ecuaciones cuando el fluido presenta un cambio de fase debido a bajas presiones y altas velocidades.

En los gráficos 10 y 11 se observan los resultados adimensionales de la tabla 14.

**Gráfico 10.**  $K_T$  experimental y CFD versus  $J$ .



**Gráfico 11.**  $10 \cdot K_Q$  experimental y CFD versus  $J$ .

## CONCLUSIONES

Para entender el funcionamiento del solver *interPhaseChangeDyMFoam* inicialmente se realizaron varias simulaciones con el solver *interPhaseChangeFoam* que consta de una bala que cavita dentro de un tanque con agua, y en la que únicamente hay movimiento del fluido.

A partir de estas simulaciones se observó el comportamiento de la fuerza de empuje a diferentes velocidades y se concluye que a menor velocidad la fuerza de empuje es más baja. Además, es posible observar la cavitación en *ParaView* como una burbuja que rodea toda la bala cuando la velocidad es 20 m/s. Las simulaciones se ejecutaron por un tiempo de 0.1 segundos durante el cual los resultados no alcanzaron convergencia.

Posteriormente, se realizaron simulaciones del tutorial "*propeller*" variando la velocidad de entrada del fluido, refinando el mallado y aumentando el tiempo hasta alcanzar convergencia. Este tutorial utiliza el solver *interPhaseChangeDyMFoam* que incluye un movimiento de la geometría, que en este caso es la hélice que rota a más de 4000 RPM.

Se ejecutaron las simulaciones considerando seis velocidades del fluido con la finalidad de obtener y graficar los coeficientes adimensionales característicos de la hélice, y con base en los resultados se puede decir que a mayor velocidad del fluido la convergencia se alcanza más rápido. Con la velocidad de 15 m/s la fuerza converge en  $t=0.08$  s, mientras que para las velocidades de 0 y 3 m/s en  $t=0.15$  segundos aún no se había alcanzado convergencia. Se cree que esto se debe a que, si la velocidad del fluido es muy baja, la hélice necesita dar más vueltas para mover el fluido hasta alcanzar estabilidad por lo tanto realiza un esfuerzo mayor. Por eso también las fuerzas de empuje resultantes son mayores a menor velocidad.

A partir de los resultados obtenidos con el refinamiento del mallado se observa que las fuerzas y Momentum disminuyen en un 5-6% a medida que se refina la malla lo cual podría ser debido a que se necesitaba dejar la simulación por más tiempo para alcanzar mayor convergencia, o debido a que se era necesario refinar más la malla.

Además, se puede observar que los resultados obtenidos con la malla media (x2) alcanzan la convergencia más rápido que las otras mallas. Incluso con esta malla los resultados presentan menos fluctuaciones en comparación a las otras mallas.

Debido a que no se tiene información experimental de la hélice utilizada en el tutorial no se pudo realizar una validación con estos resultados. Por esta razón se decidió utilizar la geometría de la hélice INSEAN E779A.

Se presentaron problemas con la geometría de la hélice cuando se realizaba un refinamiento de la malla y debido a las limitaciones de tiempo y de recursos computacionales, todas las simulaciones ejecutadas con la hélice modelo INSEAN E779A se realizaron únicamente con la malla original.

Se desarrollaron simulaciones con la hélice modelo INSEAN E779A considerando seis velocidades y se obtuvieron los respectivos resultados con el objetivo de calcular y graficar los coeficientes adimensionales del propulsor. Estos resultados presentaron una gran diferencia respecto a los obtenidos de manera experimental en el laboratorio INSEAN.

Es necesario considerar que el solver *interPhaseChangeDyMFoam* fue desarrollado para resolver las ecuaciones del fluido en casos donde se presenta un cambio de fase, y al disminuir la velocidad del fluido no se produce cavitación. A partir de estos resultados se puede concluir que este solver no produce resultados confiables para hélices en aguas abiertas. Además, se comprobó que el solver *interPhaseChangeDyMFoam* sí puede simular cavitación, como se comprobó con el tutorial "*cavitatingBullet*".

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar simulaciones con mallas más finas (x4 o x8) para visualizar si el comportamiento es similar a los resultados obtenidos con la malla media (x2) y para verificar si las fuerzas de empuje y torque continúan disminuyendo.

Además, es recomendable ejecutar simulaciones a bajas velocidades de entrada del fluido aumentando el tiempo para verificar cuántas vueltas debe dar la hélice para alcanzar convergencia.

Cada vez que se realiza un cambio en la velocidad de entrada del fluido se deben modificar los valores iniciales de  $k$  y de  $\epsilon$  en los archivos correspondientes, manteniendo constante la intensidad y la escala longitudinal de la turbulencia.

Al modificar el nombre de las geometrías de la hélice, el túnel y los ejes, se deben realizar los mismos cambios en los archivos correspondientes para evitar errores durante la simulación.

También es recomendable utilizar otro solver para realizar simulaciones en aguas abiertas.

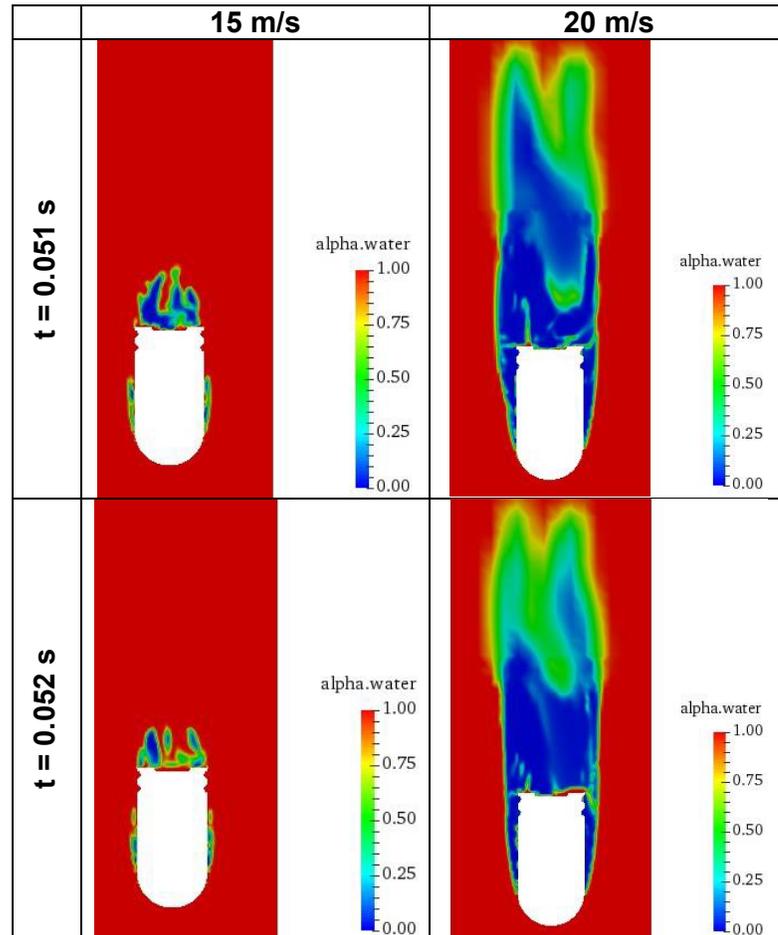
Previo al inicio de proyectos similares, es importante mencionar que se debe tener conocimientos de software para modelado de la geometría en 3D.

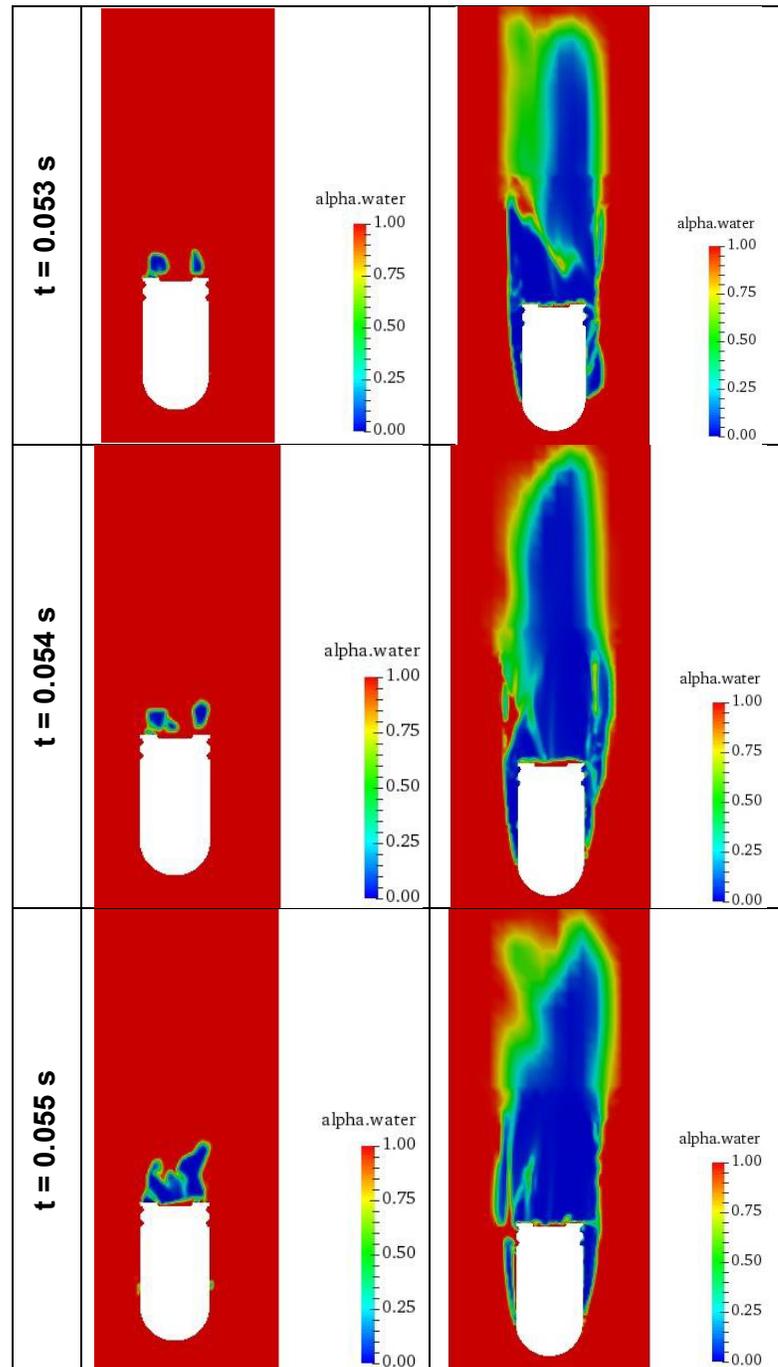
Como futuro tema de investigación, se podría desarrollar simulaciones y encontrar un parámetro que defina cuánto tiempo debe durar cada simulación hasta alcanzar convergencia.

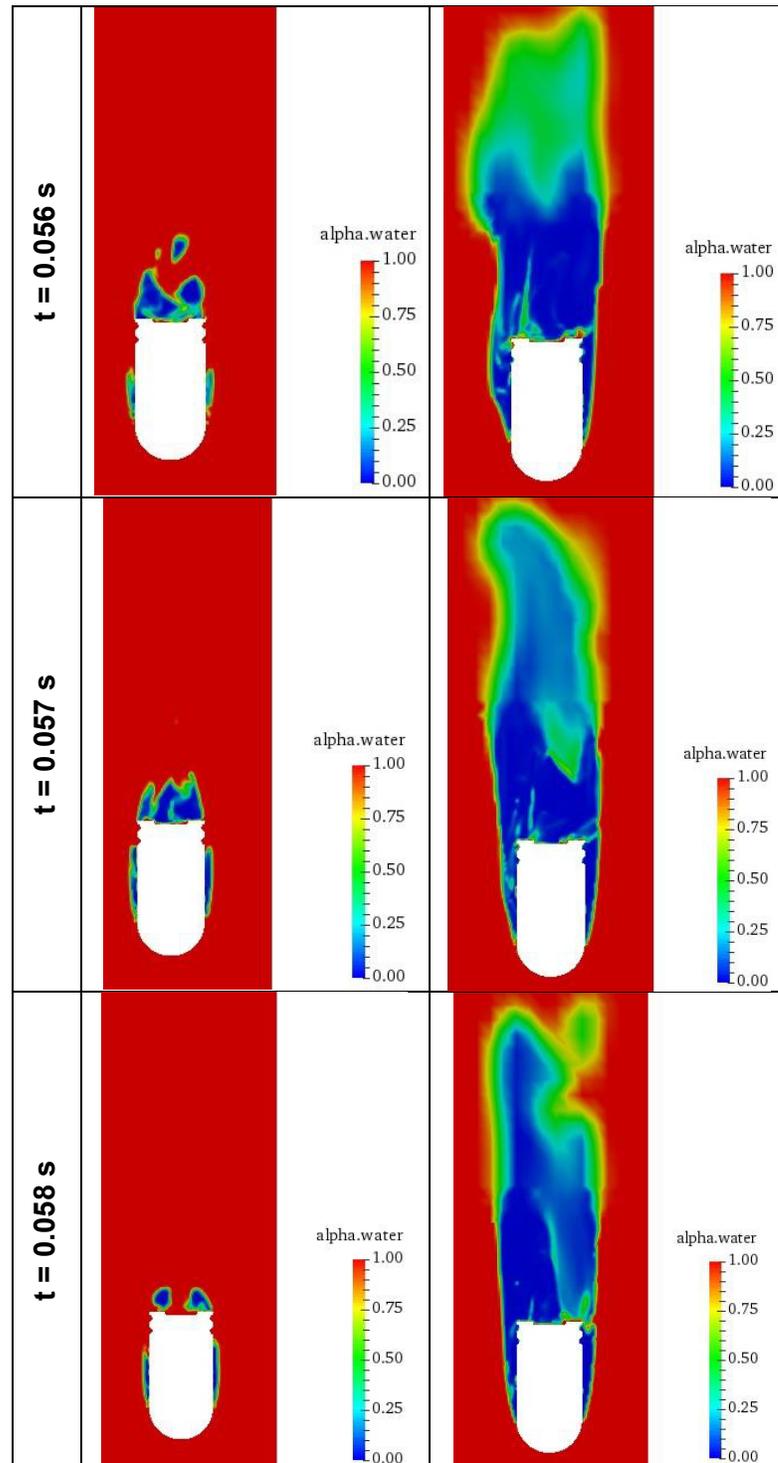
## REFERENCIAS

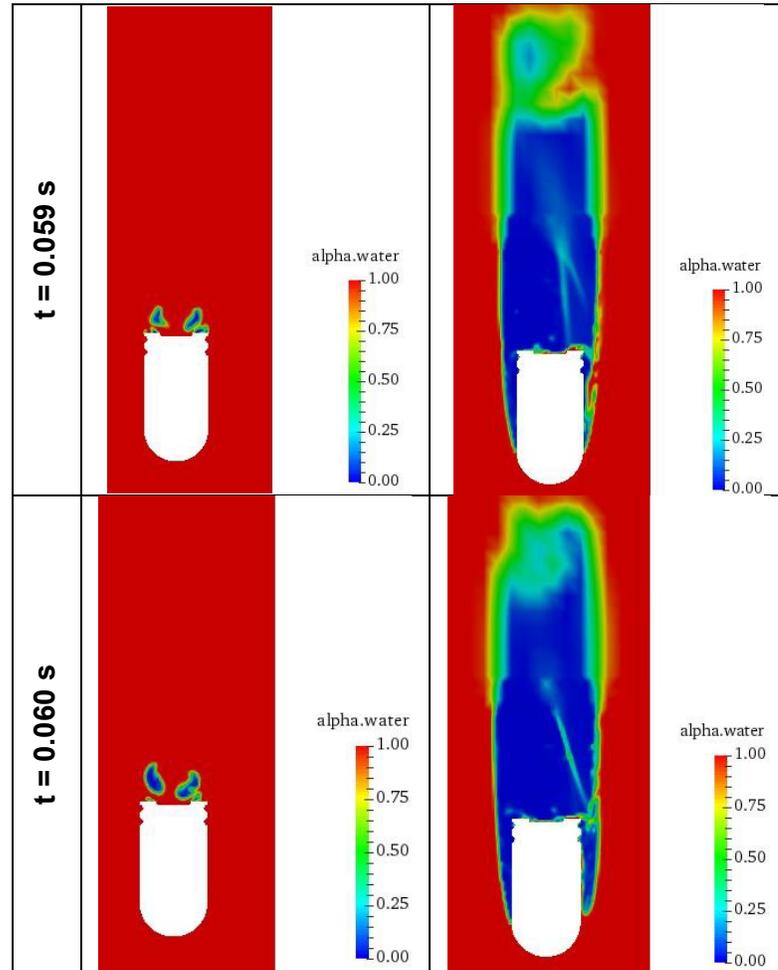
- [1] **Carlton, J. (2012).** *Marine Propellers and Propulsion*. Londres: Editorial Elsevier.
- [2] **Lewis E. (Ed.) (1988).** *Principles of Naval Architecture. Volumen II: Resistance, Propulsion and Vibration*. EEUU: Publicado por SNAME.
- [3] **INSEAN Propulsion and Cavitation Laboratory (2006).** The INSEAN E779A Propeller Dataset. Model Geometry Description.
- [4] **Andersen M., Chalmers University of Technology (2011).** A interPhaseChangeFoam tutorial.
- [5] **Zheng C., Shu L., Zhang Z. y Liu D. (2009).** The numerical simulation of propeller cavitation in non-uniform wake based on OpenFOAM.
- [6] **Hurtado D. ESPOL (2016).** Numerical hull resistance calculation of a catamaran using OpenFOAM.
- [7] **Versteeg H. K., Malalasekera W. (2007).** *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*. EEUU: Pearson Prentice Hall.
- [8] **OpenFoam,** The Open Source CFD Toolbox User Guide, Version 4.0. 24th June 2016.
- [9] **MediaWiki.** (16 de diciembre del 2014). *CFD Online*. Recuperado en enero del 2017 del sitio web CFD Online: [www.cfd-online.com/Wiki/Standard\\_k-epsilon\\_model](http://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model)
- [10] **ENGINEERING.com.** (2017). Recuperado en Enero del 2017, del sitio web: [www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/9296/3-Criteria-for-Assessing-CFD-Convergence.aspx](http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/9296/3-Criteria-for-Assessing-CFD-Convergence.aspx)
- [11] **Calcagno, G., Di Felice F., Felli, M., Franchi, S., Pereira, F., Salvatore, F. (2002).** The INSEAN E779A Propeller Test Case: a database for CFD validation.

**ANEXOS**

**ANEXO A: Vistas del campo alpha.water del tutorial “cavitatingBullet”.****Para velocidades de 15 y 20 m/s y  $t = 0.05-0.06$  s.**







**ANEXO B: Vistas del componente z de la velocidad del fluido en el tutorial  
“cavitatingBullet”.**

Para velocidades de 5, 10, 15 y 20 m/s y  $t = 0.05-0.06$  s.

