

Estudio Hidrodinámico de Propulsores Mediante el Uso de Herramienta Numérico-Computacional

Resumen- En este trabajo de investigación se estudia la fluidodinámica de configuraciones geométricas de tres propulsores con el propósito de elegir aquellos que presenten las mejores prestaciones fluidodinámicas bajo diferentes regímenes de operación. Básicamente, se analizan los parámetros dinámicos que determinan la eficiencia del propulsor a diferentes velocidades de giro, dichos parámetros son el número específico de potencia, el número específico de caudal y las velocidades de salida y avance del propulsor. Este trabajo se desarrolla utilizando la herramienta CFX del software Ansys release 17.0, en donde se modela, parte del canal del sistema de tratamiento hidrotérmico del mango en el que se ubica el propulsor, con los tres propulsores por separado con la finalidad de comparar y seleccionar el más eficiente.

Palabras clave: Turbulencia, Propulsor, N_p , N_q , Tobera.

I. INTRODUCCIÓN

La Universidad de Piura, en el 2016, desarrolló un sistema de tratamiento hidrotérmico para el mango denominado “híbrido” que, en comparación al sistema tradicional con el que contaba la empresa BioFruit SAC, es más eficiente ante protocolos fitosanitarios de mayor exigencia, como es el caso de Japón. Si bien es cierto, este sistema es capaz de procesar el mango de acuerdo al cumplimiento de las regulaciones fitosanitarias exigidas por Japón, éste puede ser mejorado mediante la aplicación de innovaciones tecnológicas que permitan obtener un mayor control sobre el proceso. En particular, se pretende reducir el tiempo de procesamiento del mango, lo cual se logra mediante el incremento del flujo de agua caliente que “baña” al mango y que se ubica inmerso en el tanque del sistema híbrido. Para lograr un sistema de tratamiento hidrotérmico eficiente, se desarrollan nuevas hipótesis, una de ellas es seleccionar un propulsor de mayor eficiencia en comparación al que labora, actualmente, en la dicha empresa.

Para una comprensión clara del porqué es necesario optimizar el flujo del fluido, en este caso agua, es necesario entender las ecuaciones constitutivas que describe la mecánica de fluido (Navier-Stokes). Ansys 17.0 es una herramienta computacional que permite simular sistemas envueltos en un flujo, transferencia de calor, entre otros procesos físicos; sobre una región de interés con unas determinadas condiciones de frontera.

II. TURBULENCIA Y SUS MODELOS DE TRANSPORTE

En muchos procesos de mezclado y procesos típicos como: transferencia de masa, transferencia de calor, dispersión líquido – líquido, suspensión de sólidos, etc., es necesario conocer el fenómeno de turbulencia debido a que tiene un efecto

fundamental en el comportamiento del fluido, sin un entendimiento de esta fenomenología se puede obtener una predicción errónea.

Se entiende por turbulencia a flujos desordenados, tanto en fluctuaciones de velocidad como en movimiento, pero sólo ha sido caracterizada, con la finalidad de entenderla debido a que no se cuenta con una definición teórica general, mucho menos un modelo general en el cual se basa su análisis. La fenomenología de la turbulencia es tridimensional, es un sistema dinámico, los remolinos que se producen no son esféricos y varían continuamente y la transferencia de energía se da de los remolinos grandes hacia los pequeños [1]

La fenomenología de la turbulencia es muy compleja, por ello se definen aproximaciones útiles que simplifiquen su análisis y por lo que es necesario limitar el número de suposiciones. Existen 5 suposiciones importantes:

- Flujo totalmente turbulento, porque la turbulencia se presenta para un elevado número de Reynolds y debido a esto la velocidad es independiente de la viscosidad.
- Turbulencia homogénea, porque la turbulencia es independiente de la posición y las componentes de la velocidad no son, necesariamente, iguales.
- Isotropía completa.
- Isotropía local.
- Flujo de corte de turbulencia, porque permite que aparezcan los esfuerzos de cizallamiento y el gradiente de velocidad media, normalmente, uno de los dos esfuerzos de corte es cero.

Es necesario modelar la fenomenología de turbulencia, para ello existe la “modelación de transporte de turbulencia”. Éste proceso de modelamiento es menos costoso, en dinero y tiempo, debido a que no se construyen experimentos de mezcla real, proporcionando información detallada sobre el comportamiento del flujo [1]. Los modelos de transporte de turbulencia más conocidos son: *Direct Numerical Simulations* (DNS), *Large Eddy Simulations* (LES) y *Reynolds Averaged Navier–Stokes Equations* (RANS), los cuales se presentan en la tabla 1. En la figura 1 muestra el espectro de energía cinética de turbulencia k en función del número de ondas χ , donde χ_c es a partir, de qué tamaño de remolino, el modelo LES, modela los parámetros del fluido.

TABLA 1

CUADRO COMPARATIVO DE LOS MODELOS DE TRANSPORTE DE TURBULENCIA

Modelo de transporte	Definición [4]	Inconveniente
DNS	Resuelve, de una forma directa, las ecuaciones de Navier-Stokes, sin emplear aproximaciones de discretización numérica. Presenta una elevada exactitud.	Las celdas para la solución de los remolinos es muy pequeña, por lo tanto requiere una elevada capacidad computacional.
LES	Modela las escalas más pequeñas y utiliza una aproximación del modelo DNS para resolver las escalas grandes.	Los requerimientos para almacenar y procesar la data se ubica fuera del alcance de diversos usuarios. Las condiciones de frontera sobre superficies sólidas son problemáticas.
RANS	Promedia las ecuaciones del fluido. Se sustituyen todas las magnitudes por la suma de su valor medio y una variable fluctuante. Modela todas las escalas turbulentas (remolinos).	Al promediar las magnitudes, aparecen otros términos adicionales que requieren de otras ecuaciones para que el sistema converja. Para ello, se necesitan de modelos como: modelo de cero ecuaciones, modelo de una ecuación, modelo de dos ecuaciones ($k - \epsilon$ y $k - \omega$) y modelo de más ecuaciones.

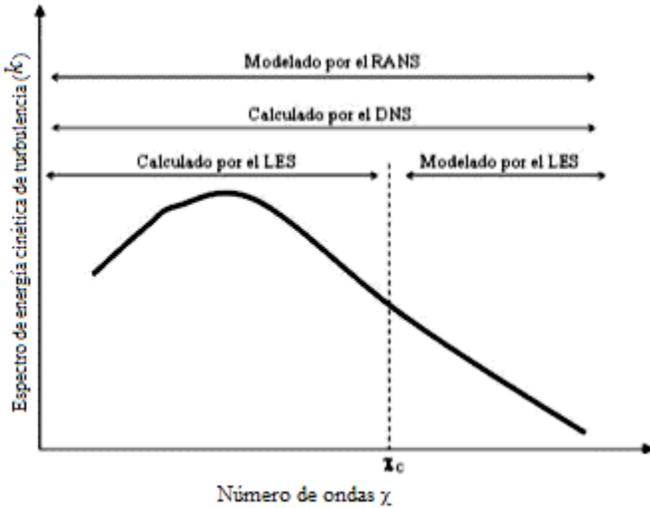


Fig. 1 Comparación gráfica de los modelos de transporte de turbulencia [4].

A. Métodos Numéricos

La simulación objeto de esta investigación se realiza en Ansys 17.0, el cual es una herramienta que modela la dinámica del fluido computacional. Para que ésta herramienta resuelva las ecuaciones numéricamente, necesita discretizarlas o transformarlas de una función continua a una discreta.

Se denomina malla a la cuadrícula donde se divide el dominio en un conjunto de subdominios discretos, células computacionales o volúmenes de control. Ésta malla contiene elementos de diferentes formas y tamaños, dependiendo del sistema dimensional en que se ubiquen, por ejemplo, en un sistema 2D los elementos tienen forma de cuadriláteros o

triángulos, y para sistemas 3D tienen elementos de forma tetraédrica, prismática, piramidal o hexaédrica como se observa en la figura 2. Los segmentos de línea para sistemas 2D y superficies planas para sistemas 3D, se conectan para generar los elementos en los límites.

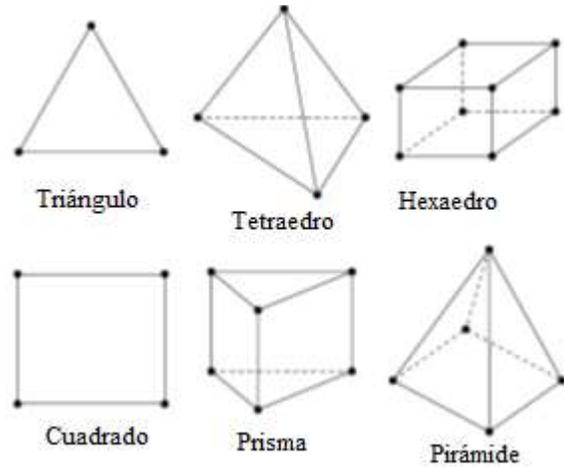


Fig. 2 Formas geométricas de los distintos elementos según el sistema dimensional [1].

Existen dos tipos de cuadrículas: las estructuradas y las no estructuradas. Las cuadrículas estructuradas son siempre cuadriláteras, para sistemas en 2D, o hexaédricas para sistemas en 3D. Cada elemento sigue una única dirección en el espacio I, J y K, las cuales no necesariamente se ubican alineadas con las coordenadas X, Y y Z. Las mallas no estructuradas, no siguen esta regla de direccionamiento y utilizan diferentes tipos de elementos. La densidad de las células en una red computacional debe ser, lo suficientemente, fina para capturar los detalles del flujo, pero no exageradamente fina, debido a que conllevaría a más tiempo en resolver las ecuaciones.

Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes se han empleado diversos métodos, pero para este caso se centrará en el método de volúmenes finitos. La ecuación 1 [5] muestra la discretización de una ecuación de transporte típica usando la formulación de volumen finito para un volumen de control rectangular.

$$\frac{\partial(\rho \cdot \phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot V_i \cdot \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S' \quad (1)$$

Donde V_i es la velocidad en la dirección i , x_i es la coordenada espacial en la dirección i , ρ es la densidad del fluido y Γ representa el coeficiente de difusión para el escalar ϕ . Si ϕ es uno de los componentes de la velocidad, por ejemplo, Γ representaría la viscosidad y S' representaría la suma del gradiente presión, fuerza gravitacional y cualquier otra fuerza adicional presente.

El primer paso para discretizar la ecuación de transporte es una integración del volumen de control, el cual puede ser transformado en una integral de superficie aplicando el teorema de la divergencia. Por lo tanto, asumiendo una velocidad en la dirección i positiva, despreciando la dependencia del tiempo y asumiendo un área A en las caras de las cuadrículas, la ecuación

de transporte se convierte en la ecuación 2.

$$(\rho_a V_a \phi_a - \rho_b V_b \phi_b) A = \left(\Gamma_a \left[\frac{d\phi}{dx} \right]_a - \Gamma_b \left[\frac{d\phi}{dx} \right]_b \right) A + S \quad (2)$$

Donde las letras a y b denotan dos caras cualesquiera de la cuadrícula y S representa la integral de volumen de los términos contenidos en S' . Entonces, para calcular los valores de las caras se requiere de un esquema de discretización.

B. Esquemas de Discretización

Los valores de las caras deben estar en función a los valores del centro de la célula, para ello se considera la ecuación de conservación de estado estacionario en una dimensión, resultando ecuación 3.

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot V \cdot \phi) = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (3)$$

Dicha ecuación brinda resultados exactos en dominios lineales que se extienden de $x = 0$ a $x = L$ con $\phi = \phi_0$ en $x = 0$ y $\phi = \phi_L$ en $x = L$. Entonces la solución para ϕ en cualquier punto central de la cara es como se representa en la ecuación 4.

$$\phi = \phi_0 + (\phi_L - \phi_0) \cdot \frac{e^{\left[Pe \left(\frac{x}{L} \right) - 1 \right]}}{e^{(Pe-1)}} \quad (4)$$

Donde Pe es el número de Péclet, el cual relaciona la influencia de la convección entre la difusión en el campo de flujo. El número de Péclet se describe mediante la ecuación 5.

$$Pe = \frac{\rho V L}{\Gamma} \quad (5)$$

Dependiendo del valor de Pe , el comportamiento limitante de ϕ varía a lo largo de la longitud. Cuando $Pe = 0$, se tiene el esquema de diferenciación central; cuando $Pe \gg 1$, se tiene el esquema de diferenciación *Upwind*; cuando $0 \leq Pe \leq 10$, se tiene el esquema de diferenciación *Power Law* y por último, se tiene el esquema de diferenciación *Quick*.

III. TEORÍA DE PROPULSORES

Los propulsores se dividen en dos subgrupos, el primero según el tipo de flujo y el segundo según la geometría del propulsor. Según el tipo de flujo, los propulsores se dividen en: propulsores de flujo axial, propulsores de flujo radial, propulsores con alto esfuerzo cortante (*High shear propeller*) y propulsores hidrodinámicos (*Hydrofoil propeller*) [1]. Y según la geometría del propulsor, éstos se dividen en: propulsores tipo hélice, propulsores de palas o paletas y propulsores tipo turbina.

IV. PARÁMETROS QUE DETERMINAN EL DESEMPEÑO DE UN EQUIPO DE PROPULSIÓN

Las fuerzas y momentos generados por los álabes del propulsor se expresan en términos de una serie de parámetros característicos adimensionales, los cuales dependen de la configuración geométrica de cada propulsor. Estos términos representan las características generales de rendimiento de los

propulsores.

A. Número de Reynolds

Es el número adimensional más conocido el cual relaciona las fuerzas de inercia o aquellas fuerzas que dan lugar al movimiento del fluido con las fuerzas de fricción o aquellas que tienden a ralentizar el fluido como son las fuerzas viscosas. Por debajo del valor del número de Reynolds de 2100 se considera que el fluido es de régimen laminar, es decir, el flujo sigue un patrón ordenado y por encima del valor de 1×10^4 , el fluido es de régimen turbulento, lo cual es un flujo desordenado, caótico. Se considera que el fluido es, totalmente, turbulento cuando alcanza un valor de 2×10^4 . La ecuación 6 representa el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 , N es la velocidad del propulsor en rev/s , D es el diámetro exterior del propulsor en m y μ es la viscosidad dinámica en $Pa \cdot s$.

B. Número específico de caudal

Es un número adimensional que representa la medida de la capacidad de caudal impulsado por un propulsor, el cual se define en la ecuación 7, donde Q es el caudal generado por el propulsor.

$$N_q = \frac{Q}{N D^3} \quad (7)$$

C. Número específico de potencia

Es un número adimensional que representa una medida de la potencia consumida y también se expresa como el coeficiente de resistencia del propulsor con el fluido. Se representa mediante la ecuación 8, donde P es la potencia del propulsor en W .

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (8)$$

Los valores de N_q se ubican en un intervalo de 0.3 y 0.8. Este número adimensional depende de la geometría del propulsor, tipo de propulsor y del número de Reynolds. A medida que el valor de Re aumenta, el valor de N_q también aumenta. Cuando el fluido alcanza el régimen turbulento, el valor de N_q es, casi, constante, tal y como se aprecia en la figura 3. Sucede lo opuesto para el número específico de potencia, cuando el fluido es turbulento, el valor de N_p es constante, pero cuando aumenta el valor de Re , hasta antes de alcanzar el régimen turbulento, el valor de N_p decrece como muestra en la figura 4 [1].

Los propulsores seleccionados para el análisis de este proyecto se basaron en el número específico de potencia y caudal, y contando de que sean propulsores comerciales. Los propulsores seleccionados son: Lightnin A310, RTF 4 y el propulsor marino, el cual opera, actualmente, en la empresa BioFruit SAC.

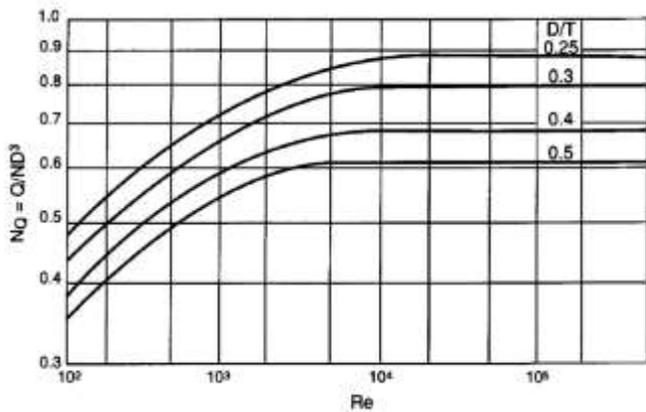


Fig. 3 Comportamiento del número específico de caudal y a diferentes números de Reynolds [1].

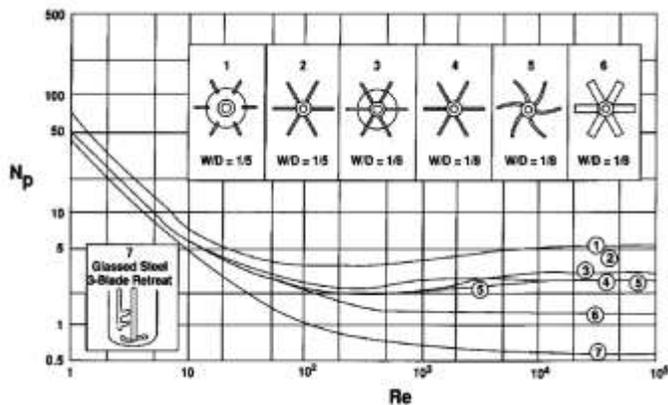


Fig. 4 Comportamiento del número específico de potencia y a diferentes números de Reynolds [1].

V. METODOLOGÍA

Se desarrollaron los 3 propulsores en la herramienta computacional *SolidWorks*. Ansys 17.0 importa los propulsores desarrollados para incluirlos dentro del canal del sistema híbrido, el cual es desarrollado por herramienta *Geometry*, un componente del sistema de *Workbench* en Ansys. A continuación se presentan las figuras 5 [6], 6 y 7 [7] con los diseños de los propulsores simulados en *Solidworks*.

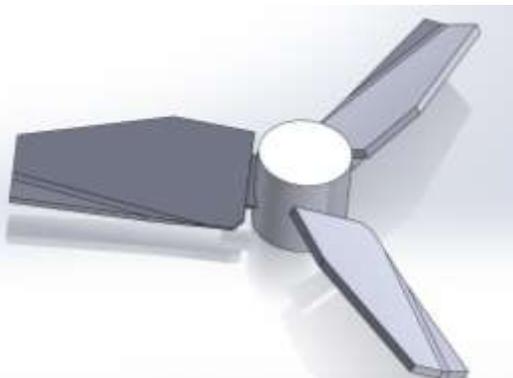


Fig. 5 Simulación del propulsor Lightnin A310 en SolidWorks.

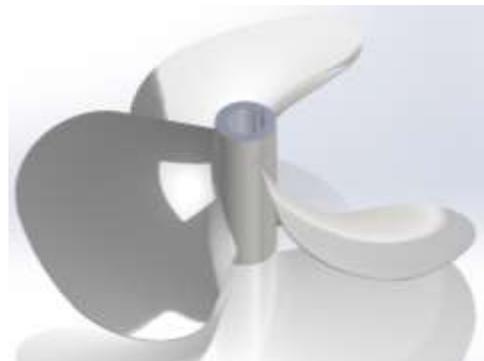


Fig. 6 Simulación del propulsor marino en SolidWorks.



Fig. 7 Simulación del propulsor RTF4 en SolidWorks.

Luego se genera un sistema de análisis denominado *Fluid Flow (CFX)*, en el cual se desarrolla la malla de la geometría, se determinan las condiciones de frontera y del fluido, se observa la solución de la simulación y se observan los resultados. Éste sistema de análisis se utiliza en todo el proyecto para modelar y observar los resultados del comportamiento del flujo del fluido a causa de la presencia del propulsor en el canal del sistema híbrido. Se modela solo parte del canal debido a que es la región en donde se aprecia el comportamiento del flujo.

En *geometry* se desarrolla parte del canal, como se observa en la figura 8. Se selecciona la geometría de interés, el cual es el propulsor para los 3 casos. Se genera una región de interés de diámetro mayor al diámetro del propulsor, para analizar el comportamiento del flujo. Se generan la entrada y salida del flujo de agua al canal, y, por último, define que geometría es móvil y estática. La geometría móvil en este caso es el propulsor y la estática son las paredes del canal, menos la entrada y salida.

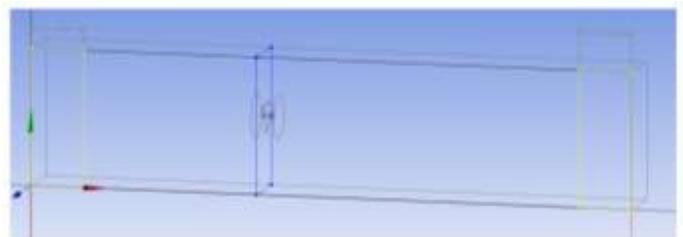


Fig. 8 Diseño del canal y región de análisis del propulsor en *geometry*.

Luego se procede a generar el mallado de toda la geometría en *Mesh* de *fluid flow (CFX)*. Se genera de forma automática, pero depende del usuario reconocer los parámetros de calidad

de la malla, los cuales son: *Orthogonal Quality* y el *Skewness*. Éstos definen la malla como aceptable o no, comparándolos con los valores promedios que definen la calidad de mallado. Para culminar en este componente del sistema, se nombran las regiones de la geometría con la finalidad de llamarlas en *Setup* para definir, de forma rápida, las condiciones de frontera. A continuación se presenta la Fig. 9 con el mallado de los 3 propulsores y del canal.

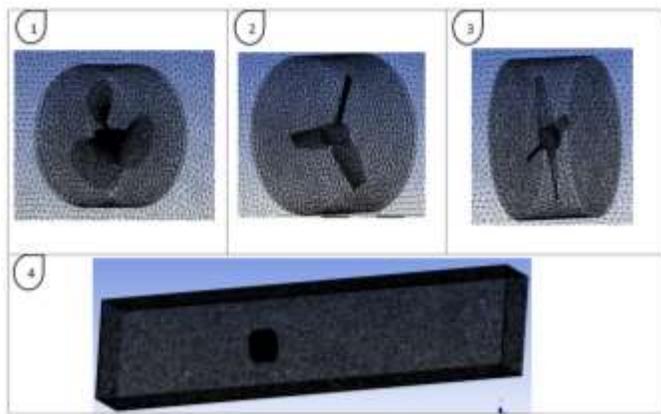


Fig. 9. 1) Mallado del propulsor marino, 2) Mallado del propulsor Lightning A310, 3) Mallado del propulsor RTF4 y 4) Mallado de la geometría completa.

Setup se ubica en la herramienta CFX-Pre de Ansys, se utiliza para generar los dominios, interfaces y expresiones. *Setup* especifica la física del flujo, condiciones de frontera, valores iniciales, parámetros de solución y condiciones de contorno incluyendo entradas, salidas y aberturas. Por lo tanto, el siguiente paso es dividir en dos dominios la geometría a simular, las cuales son: dominio fijo y dominio móvil. Aquí se resuelven las ecuaciones de flujo de fluido mediante modelos físicos y se conectan mediante interfaces de dominio.

CFX-Pre utiliza el concepto de dominio para definir el tipo de fluido, sus propiedades y región de trabajo, poroso o sólido. Los dominios son regiones de espacio en las que se resuelven las ecuaciones de flujo de fluido o transferencia de calor. Se define las propiedades físicas del fluido en las condiciones de operación real, se definen los modelos del fluido que se utilizarán para resolver la simulación. Se definen dos dominios: dominio móvil y dominio fijo. El dominio fijo hace referencia a las paredes del canal y el dominio móvil al propulsor y región de análisis. En el dominio móvil se define un dominio rotativa con una velocidad de 770 rpm en la dirección del eje del propulsor, ésta velocidad es la de operación en la empresa BioFruit SAC. Definidas complementes los dominios, se procede a generar las fronteras, para ello se llaman a las regiones nombradas en la etapa de mallado, con la finalidad de definir a qué tipo de región pertenece, sea entrada, salida, pared de álabes u otra región.

Luego se generan las interfaces de dominio. Éstas tienen diversas finalidades, pero en este análisis se utilizan con la finalidad de conectar dominios donde la malla de un solo dominio tiene diferentes volúmenes de mallado (hexaédrico o tetraédrico). También se utiliza para la modificación de los cambios en el marco de referencia entre dominios, es decir,

dominios en diferentes estados (estacionario o giratorio) [1]. Se crean 3 interfaces de dominio: lateral, superior y posterior.

El paso siguiente es realizar la configuración de *Solver Control*. Aquí se establecen los parámetros que controla *CFX-Solver* durante la etapa de solución. Primero, se seleccionan las herramientas de convergencia. Se selecciona *High Resolution o First Order*, que, básicamente, tienen consecuencias en el tiempo y convergencia de la solución. Para el número mínimo y máximo de iteraciones se utilizan valores de 50 y 2500 correspondientemente, lo que da lugar a una solución con un porcentaje de error bajo. A mayor número de iteraciones, el gasto computacional es mayor, por lo tanto se necesita de una computadora con gran capacidad.

Se generan expresiones que, en el proceso de solución, se monitorean. Estas expresiones se definen utilizando algunas combinaciones de constantes, variables, funciones matemáticas y otras opciones que brinda esta herramienta. Luego se procede a simular el modelo, el cual se puede observar en *Solutions* de fluid flow (CFX), con la finalidad de monitorear la convergencia de la simulación y de asegurarse que el error se ubique dentro del 1%.

CFD-Post, que es el componente del sistema denominado *Results*, es una herramienta flexible del estado del arte del post – procesamiento, que permite una fácil visualización y análisis cuantitativo de los resultados de CFD Simulations. Aquí se puede apreciar las líneas de corriente del flujo, el contorno del desarrollo del flujo, el vector del flujo, entre otras herramientas con las que cuenta CFD-Post.

Para contar con un entendimiento más amplio sobre el comportamiento del flujo de agua a causa del propulsor, se procede a parametrizar la simulación. Parametrizar es definir una variable con diversos valores para que afecte a otras variables. Para este caso, se decide modificar la velocidad de giro del propulsor, de 600 rpm a 1200 rpm, de 50 en 50, para observar como varía el torque, la velocidad de salida y avance del flujo y el caudal propulsado por estos dispositivos.

Para un mayor desempeño se opta por incluir una tobera anular de perfil hidrodinámico concéntrica al propulsor, como se observa en la figura 10.

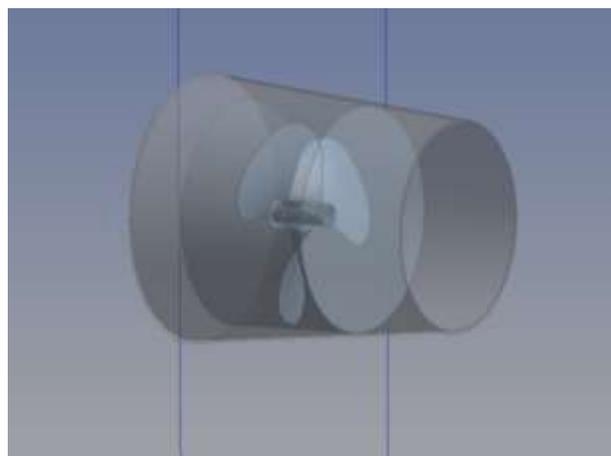


Fig. 10 Configuración de tobera convergente. En el interior se ubica el propulsor marino.

Con este tipo de sistema se logra que la dirección del flujo sea la deseada. Se selecciona este tipo de sistema debido a que se emplean en remolcadores de puerto y de altura, y debido a la gran potencia que desarrollan, resultan útiles en maniobras *very large crude carrier*, también conocidas como súper petroleros. Algunas veces se han empleado en buques mercantes, pero los resultados no fueron los esperados [2].

La velocidad de salida de la tobera se halla influenciada por las velocidades inducidas del propulsor. Los propulsores seleccionados para este análisis generan una componente radial en el flujo, en consecuencia el flujo no es netamente axial y, por ésta razón, se adiciona la tobera concéntrica al propulsor. Para convertir el flujo radial en flujo axial, y de esta forma tratar de conseguir un flujo totalmente unidireccional.

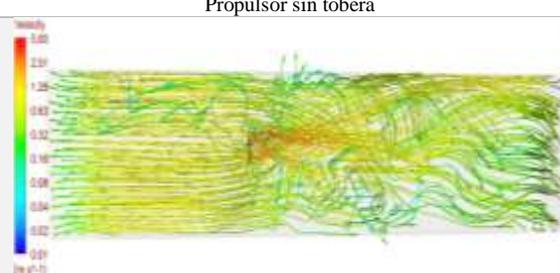
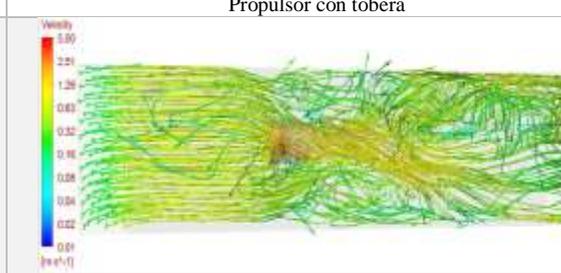
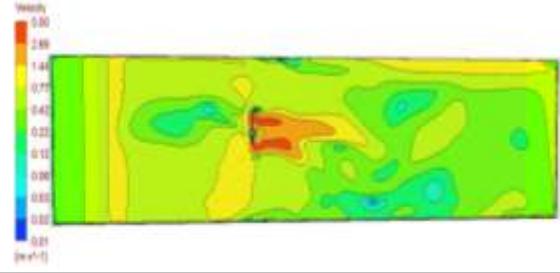
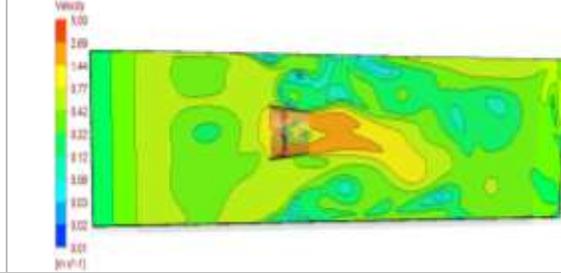
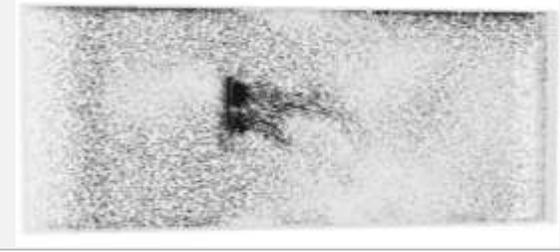
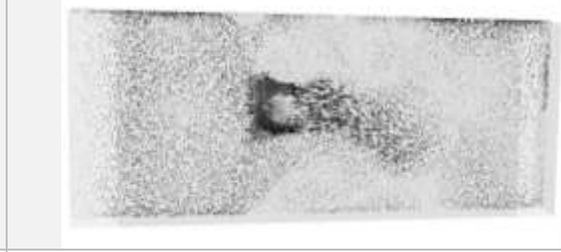
La tobera se caracteriza por: aumentar el empuje total del sistema, debido a que se suma el empuje generado por la tobera, la fuerza portante proyectada al eje del propulsor en la tobera genera un aumento de la fuerza de empuje, se consigue un mejor control de la dirección de salida del flujo del fluido y consigo se controla la dirección de empuje, la velocidad del propulsor

es mayor, debido a que en la tobera la velocidad del agua aumenta por la reducción continua del área de la tobera, aumenta la eficiencia del propulsor al disminuir el coeficiente de carga, y disminuye la diferencia de presiones entre la cara de presión y la cara de succión y aumenta el rendimiento del propulsor al disminuir la cantidad de flujo de agua alrededor del propulsor [3].

VI. RESULTADOS

A continuación se presenta la tabla 2 con los resultados obtenidos de la simulación del propulsor Lightnin A310 sin tobera y con tobera, en CFD-Post, con la finalidad de observar cuanto mejora o no el flujo por efecto de la tobera. El mismo análisis se realiza para los otros dos propulsores. Para observar los resultados de los 3 propulsores se presentan gráficas realizadas en MatLab con los datos obtenidos y procesados de la simulación de los 3 propulsores. Con la finalidad de comparar que propulsor es más eficiente.

TABLA 2
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN CFD-POST, LOS CUALES SON OBTENIDOS EN LA ETAPA DE SIMULACIÓN

	Propulsor sin tobera	Propulsor con tobera
Líneas de corriente		
Contorno		
Vector		
Isosurface		

A continuación se muestran las gráficas comparativas con los resultados de los 3 propulsores con tobera y sin tobera

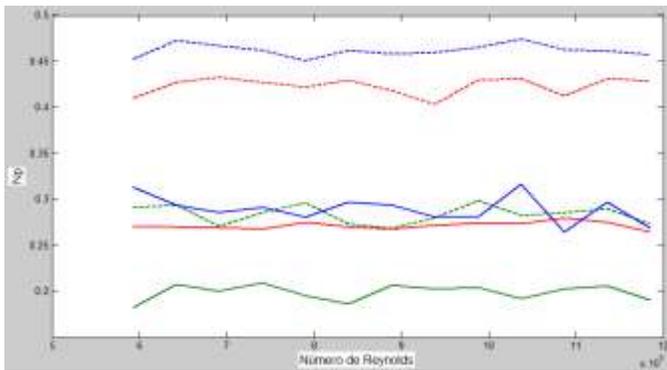


Fig. 11 Gráfico comparativo, N_p vs. Número de Reynolds, de los 3 propulsores con tobera y 3 propulsores sin tobera. Leyenda: --- propulsor marino sin tobera, — propulsor marino con tobera, --- propulsor lightnin A310 sin tobera, — propulsor lightnin A310 con tobera --- propulsor RTF4 sin tobera y — propulsor RTF4 con tobera.

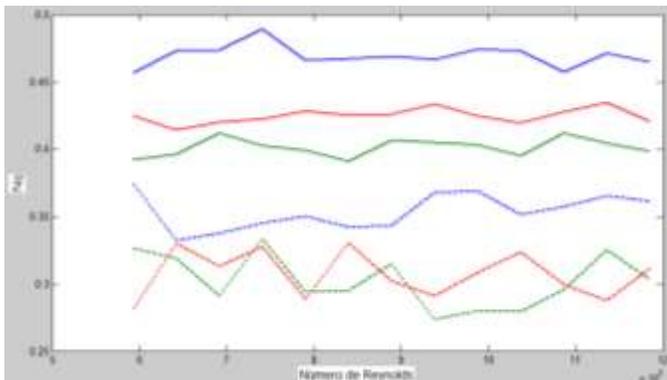


Fig. 12 Gráfico comparativo, N_p vs. Número de Reynolds, de los 3 propulsores con tobera y 3 propulsores sin tobera. Leyenda: --- propulsor marino sin tobera, — propulsor marino con tobera, --- propulsor lightnin A310 sin tobera, — propulsor lightnin A310 con tobera --- propulsor RTF4 sin tobera y — propulsor RTF4 con tobera.

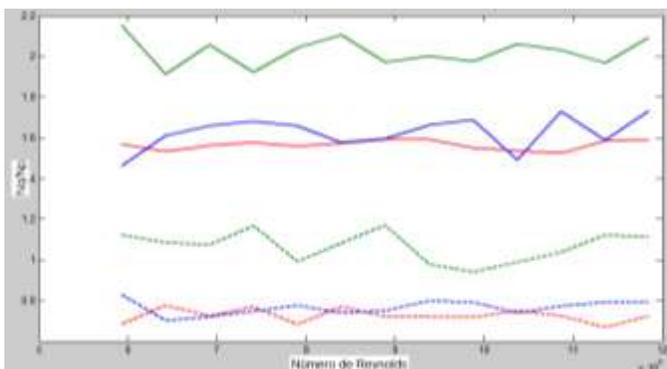


Fig. 13 Gráfico comparativo, N_p vs. Número de Reynolds, de los 3 propulsores con tobera y 3 propulsores sin tobera. Leyenda: --- propulsor marino sin tobera, — propulsor marino con tobera, --- propulsor lightnin A310 sin tobera, — propulsor lightnin A310 con tobera --- propulsor RTF4 sin tobera y — propulsor RTF4 con tobera.

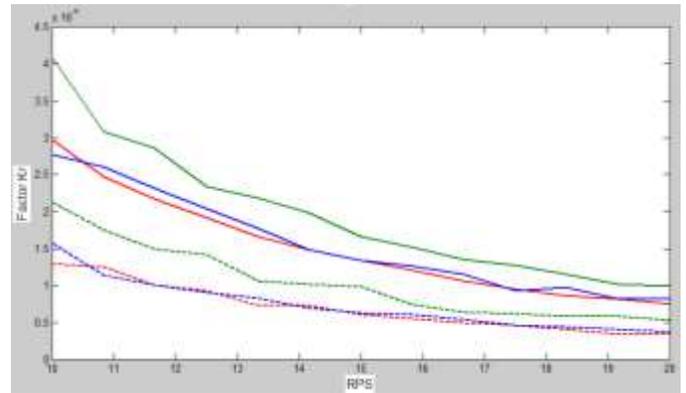


Fig. 14 Gráfico comparativo, N_p vs. Número de Reynolds, de los 3 propulsores con tobera y 3 propulsores sin tobera. Leyenda: --- propulsor marino sin tobera, — propulsor marino con tobera, --- propulsor lightnin A310 sin tobera, — propulsor lightnin A310 con tobera --- propulsor RTF4 sin tobera y — propulsor RTF4 con tobera.

VII. CONCLUSIONES

Observando los resultados de la simulación de los propulsores sin tobera, se concluye que el propulsor marino es el que tiene el mejor desempeño de los 3 propulsores. Su relación N_q/N_p es la mayor, el promedio es de 1.07 a distintas velocidades de giro con lo cual, el caudal que brinda es proporcional a medida que aumenta su velocidad de giro. Esto se puede observar en la gráfica de la Figura 70.

Los propulsores lightnin A310 y RTF4 sin tobera, con valores de N_q/N_p 0.73 y 0.77, respectivamente, aunque brindan mayor caudal y mayor velocidad de avance y salida que el propulsor marino, no presentan un desempeño destacable, debido a que; conforme aumenta la velocidad de giro; la relación potencia-caudal no lo hace de la misma forma, no de manera proporcional. En circunstancias, donde se requiera de velocidades elevadas, el propulsor RTF4 sería una opción a escoger, debido a que es la mayor de los 3 propulsores sin tobera, aunque primero sería conveniente relacionar la potencia consumida por el propulsor con el gasto económico que genera, para tener de conocimiento si es rentable.

Los propulsores con tobera presentan una mejora considerable frente a los propulsores sin tobera. Los valores de N_q/N_p promedio de los propulsores marino, lightnin A310 y RTF4 son: 2.022, 1.565 y 1.626, respectivamente. Analizando dichos valores, se observa que es, aproximadamente, el doble en comparación de los propulsores sin tobera, siendo una mejora a considerar en el sistema de propulsión del fluido en el sistema híbrido con el que cuenta la empresa BioFruit SAC.

Los valores de caudal y potencia disminuyen en promedio un 25% y 35%, respectivamente, lo cual impacta fuertemente en un ahorro económico de la empresa y un beneficio directo para la mejora de la transferencia de calor. Esto debido a que, seleccionando un valor de caudal y dividiéndola entre el área de salida de la tobera resulta en un aumento de la velocidad en comparación a los propulsores sin tobera. Con un aumento de la velocidad del flujo del fluido se logra aumentar la tasa de transferencia de calor y por consiguiente, disminuir los tiempos de procesamiento hidrotérmico del mango. De los propulsores simulados con tobera, el que presenta el mejor desempeño

continúa siendo el propulsor marino, por ello este propulsor se convierte en el más eficiente en cumplir su función en conjunto con la tobera.

Los resultados de las velocidades de salida y avance de los propulsores con tobera, son resultados obtenidos de la región de análisis del propulsor y no a la salida de la tobera, debido a que las expresiones de velocidad realizadas en Setup se han seleccionado para el área de la región de análisis.

RECONOCIMIENTOS

Los investigadores manifiestan su agradecimientos a Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico – CONCYTEC” el cual financia al proyecto Project No127-2015 FONDECYT con título: “Mejoras Innovadoras de los Equipos de Tratamiento Hidrotérmico del Mango que Cumplen con los Protocolos Fitosanitarios de Exportación a los Mercados de Japón y Estados Unidos en el Valle de San Lorenzo – Piura” y a la Universidad de Piura por el apoyo que sus instalaciones han brindado

REFERENCIAS

- [1] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of Industrial Mixing. Science and Practice*.
- [2] Fernández, D. M. (21 de Marzo de 2013). Obtenido de <http://www.atmosferis.com/helices-con-tobera/>
- [3] Hernández, Á. M. (2014). *Hélices y timones de maniobra*. San Cristobal de la Laguna.
- [4] J.A. Capote, D. A. (2008). Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. New Jersey.
- [5] Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos - fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] SPX. (s.f.). Lightnin Mixers - General Overview
- [7] Equipment, C. A. (s.f.). Chemical Plant & Engineering Pty Ltd. *Designer and Manufacturer of Process Agitation Equipment*.