

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO DE UN IMPULSOR DE BOMBA  
CENTRÍFUGA CON ÁLABES  
BIOMIMÉTICOS BASADOS EN LA PIEL DEL  
PEZ VELA**

**TESIS**

Para optar por el título profesional de Ingeniero Mecánico

**AUTOR:**

Mauricio Miguel Rivas Maldonado (ORCID: 0000-0002-1051-0181)

**ASESORES:**

MS. Omar Bejarano (ORCID: 0000-0003-4966-3131)

PhD. Julien Noel (ORCID: 0000-0001-9284-9025)

Lima – Perú

2024

## DECLARACIÓN JURADA

Yo, Omar Bejarano Grández, identificado con DNI N° 43219393, en mi condición de persona responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (en adelante, la Universidad), **declaro bajo juramento** lo siguiente:

Que el trabajo de investigación/tesis denominado: "DISEÑO DE UN IMPULSOR DE BOMBA CENTRÍFUGA CON ÁLABES BIOMIMÉTICOS BASADOS EN LA PIEL DEL PEZ VELA" ha sido elaborado por Mauricio Miguel Rivas Maldonado, identificado con DNI N° 70990804, bajo la asesoría de Julien Noel, identificado con DNI N° 48506956 y el suscrito, para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico.

El trabajo de investigación/tesis antes mencionado ha sido sometido a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la Universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.

En Barranco, el 13 de septiembre de 2024



Firma del asesor

*Dedicatoria:*

*El presente trabajo está dedicado a mis padres Miguel y Maritza, por su apoyo incondicional y el empujarme a completar todo aquello que empiezo. A mis abuelos, Miguel y Mauro, por haberme motivado y cultivado mi interés por las ciencias, así como impulsarme a cuestionar el porqué de las cosas. A mi tía Corina por haber sido un ejemplo a seguir como profesional y una inspiración en general.*

*Agradecimientos:*

*Agradezco a mis asesores Omar Bejarano y Julien Noel por haberme apoyado en las diferentes etapas del desarrollo del presente trabajo, y por ayudarme a observar que siempre hay lugar a mejora. A todos los profesores y ex-profesores de UTEC, quienes brindaron sus conocimientos durante mi trayectoria universitaria. A mis amigos de la universidad, por haber estado siempre presentes en los tiempos fáciles, y en los difíciles. A mi familia, por ofrecer su apoyo incondicional sin importar las dificultades.*

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I	24
MARCO TEÓRICO	24
1.1. Álabes	25
1.2. Bombas Centrífugas	26
1.3. Fluidos incompresibles	27
1.4. Presiones de Saturación/Vapor y Presión Local	30
1.5. Caudal y Régimen de Fluido	30
1.6. Cavitación y Pitting	31
1.7. Desgaste y Fatiga	33
1.8. CAD y CFD	34
1.9. Pez Vela	38
CAPÍTULO II	39
METODOLOGÍA	39
2.1. Caracterización de la tesis.	39
2.1.1. Finalidad de la tesis.	39
2.1.2. Enfoque de la tesis.	40
2.1.3. Alcance de la tesis.	40
2.1.4. Diseño de la tesis.	41

2.1.5. Tipo de tesis.	41
2.2. Esquema de la Metodología	42
2.3. Descripción de actividades	43
2.3.1. Fase 1: Implementación de la inspiración animal	43
2.3.1.1. Definición del Fluido de Trabajo	44
2.3.1.2. Investigación de alternativas posibles	44
2.3.1.3. Evaluación de adaptaciones en superficies Aero/hidrodinámicas	44
2.3.1.4. Implementación final de la adaptación	45
2.3.2. Fase 2: Modelado y Simulación de la bomba en una simulación CFD	45
2.3.2.1. Investigación de modelos de bombas preexistentes	46
2.3.2.2. Dibujo 3D de la bomba	46
2.3.2.3. Preparación del ensamble y exportación del archivo en formato .step	46
2.3.2.4. Selección del modelo turbulento y preparación en ANSYS CFX (Pre)	47
2.3.2.5. Ejecución de la simulación	47
2.3.3. Fase 3: Validación de los resultados	47
2.3.4. Fase 4: Análisis de los resultados de CFD.	49
2.3.4.1. Elaboración de gráficos de los resultados	50
2.3.4.2. Comparación de resultados	51
2.3.4.3. Selección de la bomba con mejor comportamiento	51
2.3.4.4. Conclusiones	53
2.3.5. Variables de la investigación	53
2.4. Equipos y Software.	54
2.4.1. Autodesk Inventor 2018	54
2.4.2 ANSYS - CFX	55

2.4.3. Computador de escritor.	55
CAPÍTULO III	56
RESULTADOS	56
3.1. Implementación de la inspiración animal	56
3.1.1. Definición del fluido de trabajo e Investigación de alternativas posibles	56
3.1.2. Evaluación de adaptaciones en superficies aero/hidrodinámicas	57
3.1.3. Investigación de modelos de bombas preexistentes	58
3.1.4. Dibujo 3D del conjunto impulsor - bomba.	61
3.1.5. Preparación del ensamble y exportación del archivo a formato .step	67
3.2. Simulación de CFD	67
3.2.1. Importación de geometría y enmallado.	68
3.2.2. Investigación y selección de modelo turbulento.	69
3.2.3. Preparación del modelo en ANSYS CFX (Pre).	70
3.2.4. Ejecución de la simulación.	73
3.3. Comparación de rendimiento.	80
CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	96

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Esquema del proceso de investigación.	42
Tabla 3.1: Dimensiones del dominio de la bomba de Hassan	60
Tabla 3.2: Configuración de los dominios en CFX Pre.	70
Tabla 3.3: Configuración de los Sub-Dominios en CFX Pre	71
Tabla 3.4: Configuración de los monitores en CFX Pre.	73
Tabla 3.5: Resultados de variables de Cabeza y Eficiencia.	74
Tabla 3.6: Comparación entre valores de Cabeza (NPSH, m) de Hassan y bomba referencial	76
Tabla 3.7: Comparación entre valores de Cabeza (NPSH, m) de Hassan y bomba referencial.	76

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Diagrama de Bomba Centrífuga	27
Figura 1.2. Explicación de la diferencia en compresibilidad entre un fluido compresible y uno no compresible (b y a respectivamente). Las secciones c y d muestran la estructura de las partículas porosas que brindan la compresibilidad del fluido b.	29
Figura 1.3. Regímenes de Flujo	31
Figura 1.4. Ejemplos de pitting obtenidos por Kühlmann y Kaiser, donde gamma es la distancia entre la superficie y las burbujas que lo ocasionaron.	33
Figura 1.5. Colapso de una burbuja y abolladura que deja sobre una superficie plana en un lapso de 24 microsegundos	34
Figura 1.6. Superficie de piel del pez vela, con regla de escala	38
Figura 2.1: Diagrama de variables controlables, entrada y salida de la simulación CFD	54
Figura 3.1: Dimensiones del impeller utilizado por Hassan	58
Figura 3.2: Dimensiones de los componentes del dominio de la bomba de Hassan	59
Figura 3.3: Dimensiones del dominio de la bomba de Hassan	59
Figura 3.4: Dimensiones del dominio de la bomba de Kim	60
Figura 3.5: Parámetros de los álabes y dominio de la bomba de Kim	61
Figura 3.6: Voluta de la bomba.	62
Figura 3.7: Área de revolución o impulsor de la bomba	63
Figura 3.8: Escama referencial y distribución base	64
Figura 3.9: Impulsor de la bomba, "escamas" en el lado de succión	65
Figura 3.10: Impulsor de la bomba, "escamas" en ambos lados	65
Figura 3.11: Impulsor de la bomba, "escamas" en el lado de empuje.	66
Figura 3.12: Succión de la bomba	67

Figura 3.13: Bomba importada a Design Modeler.	68
Figura 3.14: Enmallado del impulsor referencial, notar la extensión de la inflación sobre el álabe.	68
Figura 3.15: Enmallado base.	69
Figura 3.16: Interfaces CFX Pre	71
Figura 3.17: Interfaz Impeller_Volute	72
Figura 3.18: Interfaces Inlet_Impeller	72
Figura 3.19: Monitor de convergencia de variables de Momento y Masa.	74
Figura 3.20: Diagrama de contornos de presión absoluta, Referencial 3.5L/s	78
Figura 3.21: Vector Velocidad, Referencial 3.5L/s	79
Figura 3.22: Streamlines, Referencial 3.5L/s	79
Figura 3.23: Gráfico de comparación de Cabeza	80
Figura 3.24: Gráfico de comparación de Eficiencia	82
Figura 3.25: Presión mínima en remolinos	83
Figura 3.26: Presiones máximas en remolinos	84
Figura 3.27: Velocidad mínima en remolinos	85
Figura 3.28: Velocidad máxima en remolinos	86

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Cronograma	96
Anexo 2: Matriz Morfológica	97
Anexo 3: Vistas de Bomba Referencial.	98

## **RESUMEN**

Las bombas centrífugas son máquinas con presencia tanto en industria como en el hogar. Estos equipos están limitados por su tamaño y las características del fluido empleado. Estos límites, en términos del fluido, se determinan en función al caudal y presión de una bomba en servicio. Cuando la presión local (interna) es menor a la de vaporización se forman burbujas que colapsan en un proceso conocido como cavitación. La cavitación es un problema principal afrontado al diseñar una bomba centrífuga.

Implementaciones recientes del diseño biomimético en máquinas se han mostrado prometedoras para mejoras de rendimiento. Esto supone una oportunidad para el desarrollo de la bomba del futuro, lo que lleva a preguntar: ¿Es posible mejorar el rendimiento de una bomba centrífuga aplicando el diseño biomimético a su impulsor? Esta investigación parte de que debería de ser posible. Un diseño que permita tener mayor caudal para el mismo tamaño sería útil en aplicaciones donde el espacio es una limitante.

La presente investigación empleo el uso de herramientas CAD, fotografías y mediciones de investigadores anteriores, en conjunto con simulación CFD. Se evaluó el rendimiento de un impulsor con el pez vela como base de inspiración comparado con uno convencional. Se observó un incremento en eficiencia de 3.5% en sobrevelocidad y 0.2% en caudal nominal de la bomba referencial. La altura de descarga presentó un incremento de 5% y 8% a nominal y sobrevelocidad. Lo expuesto presenta una posible mejora respecto a los diseños actualmente en uso, es recomendable realizar más investigaciones.

### **PALABRAS CLAVES:**

Diseño Biomimético; Bombas Centrífugas; Pez Vela; CFD

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND EVALUATION OF A RADIAL PUMP IMPELLER WITH SAILFISH INSPIRED BLADES**

Centrifugal pumps are some of the most ubiquitous machines in the world, both in industrial as well as homely applications. These machines are limited by the hydrodynamic behaviour of the fluid inside it, as well as its size. When dealing with fluid limitations, flow and pressure are used as a comparison base in order to determine a pump's service limits. When local pressure drops below vapour pressure, bubbles are formed inside the pump that implode. This phenomenon is known as cavitation, and is one of the challenges when attempting to improve the performance of a pump.

Recent developments in biomimetic design have been promising to improve machine performance. This design approach then presents itself as an opportunity to develop tomorrow's pump, which proposes the next question: Can we improve the performance of a pump by applying biomimetic design to its impeller? This investigation is based upon the idea that the answer is yes. A design that proves to have a higher flow rate while maintaining pressure for a given size would be ideal for space-limited applications.

This project was executed through the use of CAD in conjunction with photographs and measurements taken by previous researchers, together to do CFD simulations. A sailfish inspired impeller was compared with a traditional one. An efficiency increase of 3.5% and 0.2% at overspeed and nominal conditions was measured. Discharge head saw an increase of 5% and 8% at nominal and overspeed conditions respectively. This shows a promising prospect for performance improvements over current designs. Further research is advised in order to validate the findings of this investigation.

#### **KEYWORDS:**

Biomimetic Design; Centrifugal Pumps; Sailfish; CFD

# INTRODUCCIÓN

El diseño biomimético es un tipo de diseño de partes o dispositivos que tiene como objetivo el mejoramiento del rendimiento de un tipo de máquina a través del uso de adaptaciones evolutivas de la naturaleza a problemas ingenieriles. El trasfondo de este enfoque se basa en la idea que los diseños tradicionales tienen limitaciones las cuales pueden ser resueltas o aminoradas mediante la imitación de los seres vivos, pues estos se han adaptado para sobrevivir en un entorno específico [1]. Es decir, existe un gran número de adaptaciones en la naturaleza que resuelven problemas que podrían estar dándose con los equipos empleados en el mundo contemporáneo. Este tipo de soluciones es de principal interés en el área del diseño aerodinámico e hidrodinámico. Es más, algunas de las investigaciones previas, se observan resultados bastante impresionantes, en cuanto a mejora de rendimiento de un dispositivo, con una reducción un 38% de las cargas por turbulencia sobre un álabe de ventilador, en un caso [2].

Un ventilador es un tipo de turbomáquina que permite el movimiento de un fluido en estado gaseoso a través de la aplicación en fuerza a través de una serie de álabes en movimiento. En el caso de un fluido en estado líquido, se emplea un dispositivo muy similar, llamado bomba. Existen varios tipos de bombas, siendo una de las más comunes la bomba centrífuga de agua. [4]

La bomba centrífuga de agua está conformada por los siguientes componentes: impulsor, álabes, carcasa, difusor, eje de potencia, puerto de entrada y puerto de salida. El agua es empujada por el impulsor, el cual emplea el uso de la geometría de los álabes para dirigirla al puerto de salida [3]. Estos álabes tienden a tener una forma que se asemeja a una cuña en curva. Es más, el nombre del dispositivo se da por la trayectoria del agua desde el

puerto de entrada hacia el puerto de salida, pues es empujada al extremo del álabe por la fuerza centrífuga en la rotación de éste.

Una de las principales limitaciones de operación de una bomba centrífuga es la cavitación. Este es un fenómeno causado por burbujas de agua dentro de la bomba las cuales causan vibraciones y otros daños a la vida útil de este dispositivo [3]. Una bomba afectada por cavitación sufre daños de picaduras en las caras de sus álabes, bajo un fenómeno conocido como picadura. Este fenómeno, aplicado a casos de cavitación, se observa como pequeñas hendiduras semi-circulares. Dependiendo de la severidad de las picaduras halladas sobre estos elementos puede desencadenar en el inicio de una fisura o en el peor de los casos, creación de perforaciones o poros. Según indica Hibbeler [13], al desencadenar en poros la cavitación, se va perdiendo el espesor de los componentes, debilitándose, a largo plazo, puede perderse completamente el material en las regiones donde está presente la cavitación. La cavitación además limita la velocidad a la que se puede mover el agua para un tamaño de bomba y altura de descarga. Para tratar de aminorar este efecto, se pueden realizar modificaciones al perfil hidrodinámico de los álabes. Al cambiar el perfil de los álabes o en este caso, su superficie, se alteran las características hidrodinámicas de estos elementos. Si se logra observar una mejora en el NPSH entregado por el equipo, existe el potencial de disminuir el efecto de la cavitación sobre la bomba, siempre y cuando la presión de succión se mantenga constante y por encima de la presión de vaporización.

Las bombas son empleadas en todo proceso que implica el movimiento de un fluido incompresible de un punto “A” a un punto “B” cuando no se puede realizar este proceso de transporte mediante la gravedad únicamente. Un ejemplo cotidiano de esto es el abastecimiento de tanques elevados de agua a nivel doméstico. El poder reducir la tendencia de los álabes de una bomba a cavitación a altas velocidades supondría el poder mejorar: la vida útil de esta, su capacidad de flujo o su eficiencia energética en funcionamiento.

Por otro lado, W. Sagong, especialista del departamento de ingeniería mecánica y aeroespacial de la universidad nacional de Seúl, menciona en su investigación de la hidrodinámica del pez vela que este tiene una superficie bastante peculiar [3]. Asimismo, menciona que la función de las protuberancias de la piel del pez vela tienen una función desconocida por el momento, pero que se teoriza que pudieran ayudar con el comportamiento de la capa límite sobre el animal. Este último punto es importante recalcar en este estudio, pues cabe la posibilidad que esta modificación a la superficie de los álabes del impulsor, pudieran mejorar las características de rendimiento previamente mencionadas.

### **Antecedentes**

El diseño biomimético ha tenido diversas investigaciones en los últimos 25 años de desarrollo. A fin de poder tener tanto un panorama general del campo de investigación, así como una apreciación de los posibles beneficios de emplear este tipo de enfoque de diseño. Para ello se seleccionaron dos estudios que ejemplifican aplicaciones del diseño biomimético[4][5], 4 estudios de aplicación del diseño biomimético en turbomáquinas[2][6][7][8], y 1 estudio de la biología de especies marinas de alta velocidad[3]. Es necesario recalcar que algunas de estas investigaciones presentan criterios e información que se tomará en cuenta para la realización de este trabajo.

En el año 2001, en el centro de investigación del diseño de la universidad de Stanford en California, se desarrolló el estudio del “Diseño Biomimético y fabricación de un robot de correr hexápodo” [4]. Para esta investigación se utilizó la base de una cucaracha común como referencia de modelo motriz para el robot, con una longitud de aproximadamente 17 cm para el robot final. Respecto a los resultados experimentales, el equipo de Clark logró que este equipo se trasladara con una taza en el orden de los 50 cm/s en terreno escabroso.

En base a los resultados, se observó que el proceso de replicar la locomoción del animal de referencia no fue perfecto, ya que mostraba mayor complejidad de la originalmente se consideró. Indican que no pueden llegar a una conclusión definitiva respecto al éxito de la replicación de la locomoción de la cucaracha pues, a pesar de funcionar en línea recta, fue evidente que ante el mínimo cambio de condiciones operativas es necesario realizar correcciones manuales a la configuración del control del robot. Es evidente por ende que este tipo de soluciones requieren un enfoque fuerte sobre el ambiente de operación y el rango de operación al que estarán sometidas las máquinas.

Esta investigación, en específico, a pesar de no estar perfectamente relacionada con el presente estudio, muestra una serie de detalles que son cruciales para la ejecución del actual. En este sentido, lo más relevante es el proceso de simplificación de la adaptación animal realizado por Clark para poder traer lo observado a un diseño ejecutable.

En el año 2018, un equipo multidisciplinario integrado por investigadores de Hitachi, el instituto de ciencia y tecnología de Chitose, la universidad médica y dental de Tokio, y la universidad de Chiba realizó el estudio denominado “Diseño biomimético inspirado en dentículos de piel de tiburón y modelado de un difusor para control de fluidos”. [2] En esta investigación, se utilizó una adaptación de la piel de tiburón a fin de evaluar su eficacia en el control de turbulencia y reducción del arrastre experimentado al interior de un compresor centrífugo de aire. Se emplearon dentículos modelados al difusor del compresor con 27 grados de pendiente. Se aproximó la geometría compleja de los dentículos a una superficie con picos triangulares a fin de facilitar la fabricación del equipo y se ejecutaron pruebas experimentales a fin de desarrollar la curva de potencia del compresor con la modificación para comparación.

Con los resultados que obtuvieron, se determinó que la curva de potencia exhibía un 8% de incremento en la diferencia de presiones entregada por el compresor a la salida del

difusor a bajos caudales, entre 60 y 75% del caudal al cual el comportamiento entre modelos fuera similar. Esto evidencia que, al aplicar sistemas de difusión y mejora del comportamiento de la turbulencia local, lo que a su vez lleva a una mejor capacidad de compresor.

Otro estudio que resulta importante en el desarrollo del campo de investigación es el de Haihang Wang, et al. de 2019 [5]. El objetivo principal fue el diseñar una estructura que pueda reducir la erosión en la tapa del núcleo hidráulico de una válvula. Para esto, se basaron en la estructura de fractales de una concha marina y la piña de un pino. Esto fue combinado con la estructura de un brócoli romanesco, lo cual llevó a un diseño que los autores probaron versus uno convencional. En cuanto a lo resaltante de los resultados experimentales, se muestran mayores velocidades de burbujas en las válvulas modificadas vs. la convencional. Esto implica que las válvulas tienen menos probabilidad de atascarse por la arena que se inyectó al torrente de agua de prueba. En base a esto, concluyen que la geometría desarrollada en base al diseño biomimético logró mostrar válvulas con mayor eficiencia de flujo, pues las pérdidas de velocidad observadas fueron reducidas por la geometría seleccionada. Es más, se observa que al momento de realizarse el cambio de geometría entre la válvula referencial y la biomimética de mayor complejidad, se incrementa la velocidad de flujo hasta en un 200%.

Añadiendo a la base de experiencia que brindan los estudios anteriores, un proyecto ejemplar, desarrollado por Jinxin Wang en 2019 [6] resulta ser bastante interesante en lo que concierne a los diseños biomiméticos. Este proyecto buscó mejorar el diseño de un ventilador de flujo mixto mediante el diseño biomimético. Cabe resaltar que en este se empleó el uso de herramientas de CFD en conjunto a las condiciones de trabajo de un ventilador existente para realizar el diseño nuevo. Esto es de interés, pues muestra el uso de CFD en la simulación de sistemas de transporte de fluidos, en este caso aire, que emplean diseño biomimético. El diseño resultante de este estudio fue uno que se caracteriza por el uso de pequeños surcos en los bordes de contacto del ventilador, para reducir los vórtices en operación. Se observa en

sus resultados experimentales una reducción de la energía cinética turbulenta hasta llegar al 60% de la observada en el modelo convencional, con una mínima pérdida de eficiencia de presión. En base a esto, los investigadores concluyen en que se logró realizar un modelo que redujera los vórtices en el ventilador de manera efectiva, por sobre todo en la superficie de los álabes del ventilador. Este punto final es bastante impactante, pues implica que la superficie de contacto con el fluido puede estar mejor aislada de la turbulencia en tanto se realicen los ajustes adecuados a la característica de vorticidad sobre esta.

Por otro lado, se encuentra el proyecto de desarrollo de Xiaomin Liu et al de 2012[7]. Se realizó un proceso de mejora para ventiladores centrífugos utilizando aspas “biónicas”. El objetivo principal era la búsqueda de un diseño capaz de entregar un mejor nivel de rendimiento a la maquinaria que los diseños convencionales. Se inspiraron en las características de vuelo de un búho de orejas largas, debido a su característico vuelo silencioso. Esto se combinó con herramientas de CFD (modelo de turbulencia LES) para poder llegar a un modelado que les permitió definir una geometría óptima. Para las pruebas emplearon el uso de micrófonos y una cámara sellada para el flujo del aire a través de este ventilador. Sus resultados son de interés, pues muestran una reducción del ruido a la par con un incremento en el caudal del ventilador al variar la geometría para la misma condición de rotación. Esta reducción se observa en la magnitud de 3 dB(A), de 49.7 a 44.9 en su simulación, con un incremento de caudal de 0.02 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente un 10% en incremento. De las conclusiones del estudio, cabe resaltar que el uso de sistemas de modelado de flujo turbulento puede resultar útiles en investigaciones como esta. Además de lo anteriormente mencionado, se muestra, nuevamente, que se pueden llegar a observar mejoras significativas en el rendimiento de maquinaria al utilizar diseños biomiméticos.

Asimismo, se observa la investigación de Xiaobo Gong et al de 2021 [8]. En aquel proyecto, el objetivo principal fue la optimización de un proceso de transporte de agua salina mediante una bomba centrífuga de etapas múltiples. Específicamente, la optimización de la bomba centrífuga de etapas múltiples, bajo agua salina. Se utilizaron sistemas de modelado

por computadora, CFD, para poder realizar un diseño que los investigadores consideraron como adecuado. Asimismo se empleó el uso del algoritmo “murciélago” (un algoritmo de optimización global basado en el proceso de ecolocación de un murciélago, se evalúan los parámetros de velocidad, posición, ruido y frecuencia), de esta manera el aspecto del uso de diseño biomimético en este proyecto llega a ser el algoritmo de búsqueda más que un diseño como tal, lo que muestra que el diseño biomimético no es exclusivamente de aplicación en el sentido de replicar un mecanismo físico, sino que puede ser incluso una metodología de búsqueda de solución, en este caso, un algoritmo de búsqueda basado en la ecolocación de un murciélago. Además de esto, se realizaron pruebas en laboratorio para validar los resultados del CFD. Se observa que el diseño referencial, pese a tener una mejor curva característica para fines de aplicación con rangos amplios de caudal, en casi todos los puntos, a menor caudal y hasta el punto de máxima eficiencia, la eficiencia energética de la bomba optimizada con su algoritmo es aproximadamente 5% mayor a la referencial.

Después de evaluar sus propuestas de diseño, logran demostrar que un diseño optimizado puede llegar a tener incrementos en rendimiento bajo carga, no solo esto, sino que lograron eliminar los vórtices mayores durante la operación. Concluyen que este tipo de enfoques al momento de optimizar bombas multi-etapa puede llegar a ser apropiado, sin embargo, consideran que es necesario realizar ajustes manuales a criterio del diseñador para garantizar que el rango operativo sea el adecuado.

Por último, tenemos el estudio de W. Sagong et al del 2013 [3]. Aquel estudio buscó caracterizar el comportamiento hidrodinámico del pez espada y el pez vela, así como evaluar qué partes de la estructura de estos animales afecta el comportamiento hidrodinámico de este. Se empleó el uso de dos especímenes disecados, uno por especie para lograr este cometido. La investigación se enfocó en el estudio de la fuerza de arrastre sobre el cuerpo y la velocidad de la capa límite sobre su superficie bajo un número de Reynolds semejante a aquel que hubieran experimentado durante su crucero, es decir en el orden de  $7 \times 10^7$ . Se empleó el uso de túneles de viento para poder medir los parámetros elegidos. Se indica que se emplearon

túneles de viento de tipo göttingen (cerrados) debido al estado desecado de las muestras de pez vela y espada que, además de un bajo nivel de estudio respecto a su locomoción, impidió que se pudiera realizar una comparativa más cercana a su situación in vitro. Se realizaron pruebas con y sin los picos de ambos animales puesto que se tenía como hipótesis que la punta de estos afectaba la transición de flujo de laminar a turbulento. Después de evaluar sus resultados, observaron que los coeficientes de arrastre son extremadamente bajos para ambos peces, en el orden de  $CD = 0.010$ , así como el hecho que el pico no tiene influencia observable sobre el comportamiento del fluido bajo condiciones de crucero. Por último, y el detalle de mayor interés, se observa que las protuberancias del pez vela generan vórtices a una distancia de la superficie del pez, e indican la hipótesis que estos puedan estar generando un retraso en la separación de la capa límite por el flujo turbulento a máxima velocidad y/o al momento de realizar movimientos violentos. Se indica así mismo, que el detalle de comprobación de esta hipótesis se encuentra fuera de los límites que permite su equipamiento.

## **Justificación**

La presente investigación busca evaluar que es factible mejorar el rendimiento de bombas centrífugas mediante la modificación del impulsor a través del uso del diseño biomimético. La posibilidad de un rendimiento superior como resultado de esta investigación implicaría un posible ahorro de energía o un equipo más compacto para una aplicación dada.

Estudios anteriores han evidenciado que el rendimiento de ciertas turbomáquinas puede ser mejorado en base a modificaciones en su diseño adaptando características observadas en animales aéreos o marinos. [2] [6] Las mejoras de rendimiento observadas fueron lo suficientemente sustanciales como para indicar en sus conclusiones que mayor trabajo de investigación debería darse antes de poder llegar a una solución práctica. Es más, uno de los mayores problemas observados en las investigaciones en torno al diseño biomimético es la complejidad de fabricación de equipos que emplean este tipo de adaptaciones por el uso de geometría compleja.

Este estudio busca por contraparte el proponer una solución que pueda emplear una adaptación más simple de fabricar que las anteriormente propuestas, e intentar que este diseño sea un beneficio neto para el rendimiento de las bombas centrífugas. Para esto, se ha propuesto el implementar una superficie de álabe similar a la de la piel del pez vela, pues parece ser un candidato prometedor para una bomba centrífuga.

En primer lugar, el pez vela es conocido por ser uno de los animales acuáticos con la mayor velocidad de desplazamiento, llegando a una velocidad crucero de aproximadamente 100 km/h [3]. Esto lo hace un candidato ideal para adaptarse al diseño de una bomba centrífuga. En este estudio el enfoque se da alrededor de las protuberancias en las escamas cuasi-óseas del animal. Se escogieron por el posible rol que pueden cumplir en la capacidad de nado a velocidad, así como la relativa simplicidad del concepto comparado con los denticulos de un tiburón.

Esto, en conjunto con el conocimiento sobre la efectividad del uso de la imitación a la piel de un tiburón sobre el rendimiento de una bomba lleva al hecho que no se ha explorado esta solución específica aún. Al tomar en cuenta lo mencionado anteriormente podemos llegar a la siguiente pregunta, ¿Es posible mejorar el rendimiento de una bomba centrífuga utilizando una superficie de álabes modificada en base a la piel del pez vela? De manera preliminar, se considera que es una posibilidad. Este estudio tiene entonces la idea de, mediante sus resultados, demostrar una posible mejora en el diseño de las bombas centrífugas, lo cual, a su vez, podría mejorar el consumo energético o la contaminación sonora al momento de emplear estos dispositivos. De manera similar, este estudio brindará información y resultados que servirán como punto a partir para investigaciones futuras, que tienen a su vez la capacidad de revolucionar el mundo de las bombas de agua. Esto sobre todo en el área del diseño biomimético aplicado a bombas de agua, pues no hay grandes antecedentes bibliográficos en el área.

## **Alcance y limitaciones**

Este trabajo de investigación pretende realizar un análisis computarizado del efecto del cambio de geometría de los álabes de una bomba centrífuga en el comportamiento de una bomba centrífuga. Se estará considerando un diseño referencial de impulsor con álabes con superficie convencional. Este será comparado contra un diseño en el cual cambia la superficie de los álabes basándose en la piel del pez vela. Este animal presenta protuberancias de aproximadamente 5 mm de largo, 2.5 mm de ancho y 0.5mm de altura esparcidas en un patrón regular diagonal. Para fines de la presente investigación, se consideran únicamente bombas centrífugas y sus características de funcionamiento.

Las bombas centrífugas se emplean para el transporte de fluidos limpios y turbios. Todos los fluidos que se pueden transportar por bomba pueden generar cavitación. El agua es el más común entre todos estos, pues se emplea en uso doméstico, industrial y académico. Por esta razón y el hecho que el agua es un fluido newtoniano se seleccionó al agua como fluido de trabajo para todos los diseños analizados. Esta decisión se basa en poder realizar las simulaciones en CFD con la mayor precisión posible dentro de las limitaciones de los recursos disponibles.

Por otro lado, las pruebas computarizadas estarán enfocadas en el análisis de la distribución de presiones en la superficie arrastrada. Cabe resaltar que, por la naturaleza del flujo forzado dentro de una bomba, se empleará el uso de simulaciones CFD, a través del software ANSYS, para poder evaluar el flujo turbulento. No se realizarán pruebas en físico debido al tipo de análisis que se busca realizar en este proyecto de investigación.

Además, no se considerará el material empleado de la bomba en la simulación. Eso se debe a que el enfoque de este proyecto yace sobre las diferencias del comportamiento

hidrodinámico de dos geometrías distintas e incluir el material como variable podría complicar la simulación, y llegar a ser una limitación del estudio.

### **Objetivo general**

Diseñar y evaluar un impulsor de bomba centrífuga que, mediante el diseño biomimético aplicado a sus álabes, pueda tener un mejor rendimiento en funcionamiento en términos de cavitación.

### **Objetivos específicos**

- Determinar la manera en la que se adaptará la piel del pez vela a un diseño de impulsor, basándose en las características que determinan su carácter hidrodinámico en la naturaleza.
- Realizar un modelo 3D del diseño utilizando CAD, preparar y ejecutar una simulación del comportamiento hidrodinámico del modelo de la bomba mediante CFD.
- Validar de los resultados obtenidos en la simulación CFD utilizando la simulación de control o referencial.
- Evaluar el rendimiento hidrodinámico del diseño propuesto contra uno convencional a través de la comparación del comportamiento de la eficiencia, altura de descarga, presión interna y velocidad al interior de la bomba en la simulación.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

Las bombas centrífugas tal y como el resto de los equipos rotativos que se emplean para desplazamiento de fluidos, están sujetas a las limitaciones de operación por el entorno hidrodinámico. Para afrontar este tipo de limitaciones y buscar soluciones innovadoras, en los últimos 30 años se han realizado diversos estudios para intentar replicar las adaptaciones de la naturaleza optimizadas para estos entornos. Este tipo de soluciones es hallado con mayor frecuencia cuando se afrontan problemas que tienen una complejidad elevada, la cual puede complicar el análisis de los fenómenos observados. Tanto las aplicaciones de aerodinámica como hidrodinámica se prestan a candidatos ideales para lo indicado. Este tipo de soluciones, así mismo, ha sido moldeada, en términos del método a seguir, en base a estudios pioneros, como los de Clark et al [4], del diario de la IEEE en robótica y automatización c.a. 2001. Este tipo de estudios, demostraron que, desde su infancia, el diseño biomimético contó con gran potencial en brindar soluciones innovadoras basadas en lo observable en el mundo animal, hecho que guía la presente investigación.

Para el propósito de esta investigación, dado que fundamentalmente se está trabajando en base al funcionamiento general de una bomba centrífuga, es necesario detallar los términos y fenómenos que describen el funcionamiento de aquel dispositivo. Para ello, se requieren definir los siguientes términos clave: Cavitación, CFD, Pitting, Desgaste, Alabes, Presión Local, Presión de Vapor/Saturación, Fatiga, fluido incompresible, Carga, Régimen de fluido, CAD y caudal. Se consideran estos términos como adecuados para definición pues son necesarios para poder entender el funcionamiento del dispositivo a diseñar (bomba centrífuga) y las herramientas a utilizar durante el proceso de diseño. Sin más preámbulo, en este capítulo se empezará por los términos/fenómenos más básicos para luego llegar a aquellos que hablan acerca de condiciones más complejas

## 1.1. Álabes

Los álabes son un componente crucial de una turbina, compresor o bomba. Para ser específicos, en el caso de una bomba se refiere al componente que se encarga de impulsar al fluido que se quiere mover de un punto a otro. Los álabes son un componente mecánico que se encuentra en movimiento constante mientras que la bomba se encuentre en operación. La apariencia de este componente se asemeja a lo que vendrían ser las aspas de un ventilador, y sirven de análogo a estas dentro de lo que es una bomba. Al encontrarse en contacto permanente con el agua, existe una serie de fenómenos que ocurren en el espacio que ocupan los álabes, fenómenos que se explicarán a lo largo de este capítulo. Estos incluyen a: Pitting, Desgaste, Cavitación y Fatiga. [9]

Para poder realizar un análisis adecuado de una bomba centrífuga, es necesario enfocar los puntos en los que estas muestran diferencias en rendimiento. Para propósitos de este proyecto, es necesario observar las siguientes variables: Altura de descarga, Presión interna o local de agua, Velocidad interna o local del agua y Eficiencia energética. Esta primera se encuentra relacionada directamente con las presiones diferenciales del fluido, es decir, muestra la diferencia entre presión de descarga y presión de succión. Esta variable es útil pues permite demostrar si es que la bomba está más cerca de cavitarse o no. Esto se observa ya que mediante se aumenta el caudal de flujo, ante una velocidad rotacional constante, la altura de descarga tiende a caer. Si la presión de succión cae por debajo de un mínimo, empieza a cavitarse la bomba. La presión interna y la velocidad interna son inversamente proporcionales, y nos permiten visualizar (mediante simulaciones y gráficos) el comportamiento de los puntos mínimos dentro de una bomba. Finalmente, la eficiencia toma importancia para poder observar la cantidad de trabajo requerido para ejecutar el funcionamiento de la bomba, no es muy útil tener un ejemplar con mejor rendimiento general si este termina utilizando mucha más energía para realizar la misma tarea.

## 1.2. Bombas Centrífugas

Una bomba centrífuga es un dispositivo que permite el transporte de líquidos mediante el uso de una cámara cerrada donde una serie de álabes es impulsado por un sistema de propulsión rotativa (ya sea a mano, un motor eléctrico o un motor recíprocante /de combustión interna o turbinas de gas/vapor). Una bomba centrífuga es caracterizada por su apariencia en forma de caparazón de caracol. Es importante para esta caracterización recordar que la bomba en sí es solamente el conjunto de carcasa, eje e impulsor. Se conocen como bombas centrífugas, pues empujan al líquido a los extremos de la carcasa al momento de desplazar a la salida. El propósito de esto es el reducir la velocidad del líquido hacia afuera para aumentar el nivel de presión que se encuentra dentro de la cámara. [9] Este incremento de presión se ve reflejado en una mayor velocidad de salida del fluido.

El rendimiento de una bomba centrífuga está directamente asociado a la velocidad de rotación del impulsor, las características del fluido de trabajo, la geometría de los álabes y el tamaño de las tuberías de succión y descarga. En este tipo de máquinas, tal y como comentan Shah et al [10], las curvas de capacidad y eficiencia muestran que los puntos de mejor rendimiento en bombas centrífugas convencionales son inversamente proporcionales a su capacidad para una velocidad rotativa definida, es decir que, al incrementar la capacidad, o ratio entre caudal y presión de descarga, la bomba pierde eficiencia energética/mecánica para la misma condición de rotación. No obstante, estos autores muestran, así mismo, que esta pérdida de eficiencia se puede compensar con un incremento de la velocidad rotativa, o sea, el punto de mayor eficiencia se desplaza a una condición de mayor rotación. Así mismo, las bombas centrífugas se encuentran limitadas en su operación por los valores de presión local observados al interior del impulsor de esta, para un diámetro específico de impulsor, hay un caudal o presión máximos que puede entregar una bomba antes de salir fuera de parámetro e incurrir en cavitación.



Figura 1.1: Diagrama de Bomba Centrífuga [10]

La figura 1.1 muestra una bomba centrífuga y su impulsor. Se puede observar la forma característica de la voluta en la parte izquierda de la imagen. La descarga se encuentra por la parte superior y la succión sobre la horizontal. La parte derecha muestra un impulsor, el foco del presente estudio.

### 1.3. Fluidos incompresibles

Al haberse determinado que el fondo de este proyecto de investigación gira en torno al uso de máquinas para transportar líquidos, en este caso, bombas centrífugas, es necesario determinar lo que es la compresibilidad de un fluido, parámetro importante para poder delimitar el fluido de trabajo a utilizar en el dimensionamiento. Desde un punto de vista fundamental, los líquidos se suelen considerar como incompresibles pues su densidad se mantiene constante sin importar la presión que se les aplica (con excepciones debido a los cambios de estado), es decir, el volumen que ocupa una masa dada es constante pues las variaciones son despreciables en esta escala. [9] Esto implica que al incrementar la presión

de un fluido, o al aplicar una fuerza, este mantiene sus características volumétricas, aspecto idóneo para su uso dentro de dispositivos como las bombas centrífugas.

No obstante, esta característica no es garantizada, como nos indican Lai et al [11], el motivo por el que los líquidos son comúnmente asumidos como incompresibles es por la estructura molecular que presentan la mayoría de los elementos, mezclas y compuestos al estar en estado líquido. En este caso, lo que indica el grupo de autores mencionado anteriormente, es que, para poder comprimir un fluido, este tiene que tener espacio para poder desplazarse, a nivel molecular. Si el fluido no tiene manera de desplazar las moléculas a los espacios vacíos, no puede comprimirse, sin importar la fuerza o presión aplicada sobre este, pues son las interacciones intermoleculares las que evitan que se comprima. Lai et al demostraron que, al tener presencia de partículas o moléculas porosas en un líquido, este puede ser compresible.

Para fines de esta investigación, se está modelado todo empleando agua pura en condiciones estándar. De esta manera se puede garantizar que, para fines de cálculos, el agua presenta un comportamiento de fluido incompresible por lo que se puede evaluar el comportamiento del sistema en condición cuasi-estática.

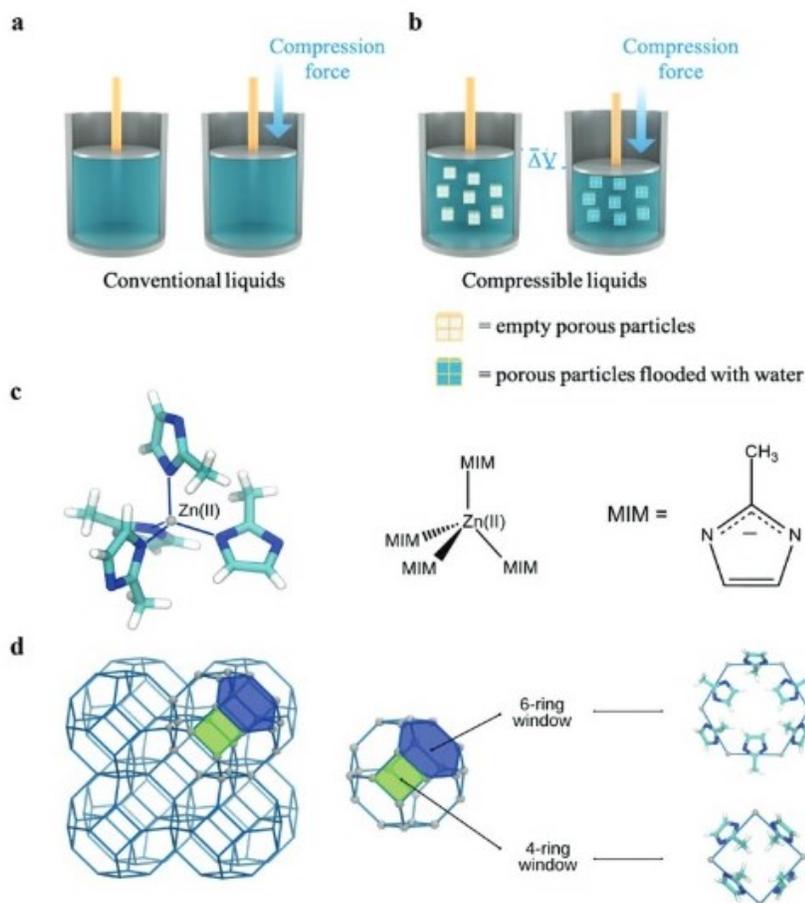


Figura 1.2. Explicación de la diferencia en compresibilidad entre un fluido compresible y uno no compresible (b y a respectivamente). Las secciones c y d muestran la estructura de las partículas porosas que brindan la compresibilidad del fluido b.

La figura 1.2 nos muestra, de manera gráfica, el comportamiento de las estructuras moleculares que permiten o previenen que un líquido sea compresible. Para fines de la presente investigación, es de especial interés el observar que en la molécula de líquido compresible, existen espacios donde una molécula de aire podría alojarse. Esto es lo que estos autores indican que da la propiedad de compresibilidad del fluido, es la capacidad de poder desplazar las partículas de tal manera que una misma masa ocupe menos espacio. En el caso del agua empleada para la evaluación en esta investigación, esta no es porosa, por lo que es un fluido incompresible.

#### **1.4. Presiones de Saturación/Vapor y Presión Local**

Todos los fluidos tienen un valor de presión conocido como presión de saturación, y un valor de presión de vapor. La presión de saturación hace referencia al valor de presión del fluido cuando este no puede contener una mayor cantidad de masa de este para un volumen dado. Esto usualmente hace referencia a gases, sin embargo, desde el punto de vista de los líquidos, es importante considerar la presión de saturación pues es en la que se pueden observar mezclas de líquido-gas, algo que se debe de evitar en turbomáquinas. La presión de vapor es aquella a la que un líquido va a realizar un cambio de fase a estado gaseoso. Para fines de esta investigación las presiones de vapor y saturación representan el punto mínimo por el que no se debe de pasar a fin de prevenir la cavitación. Es decir, las presiones deben de mantenerse en todo momento por encima de estas propiedades constantes del fluido.

El término presión local hace referencia a una ubicación de medición específica del parámetro de presión. Para fines de esta investigación, y al momento de hablarse de bombas centrífugas, la presión local hace referencia a la presión en un punto infinitesimal al interior de la bomba, usualmente con énfasis en la región próxima al impulsor. En este tipo de aplicaciones, tal y como nos comentan Qiu et al, el control de la presión local es de suma importancia, pues la cavitación ocurre al momento que la presión local al interior de la bomba es inferior a la presión de vaporización del fluido de trabajo [12]. Este parámetro se puede observar como las gradientes de presión que se grafican mediante el uso de CFD.

#### **1.5. Caudal y Régimen de Fluido**

El término caudal hace referencia a una tasa de flujo del agua a través de un espacio, expresada en términos del volumen, usualmente en metros cúbicos, sobre una unidad de tiempo. [9] La dimensión de esta propiedad de un fluido en movimiento altera lo que se conoce como régimen de fluido. Este término hace referencia a cómo es que las moléculas

del fluido en movimiento interactúan entre sí. Existen tres regímenes de flujo que consideraremos para este estudio, laminar, turbulento y de transición. El primero hace referencia a un flujo caracterizado por ser ordenado, de bajas velocidades, y por fluir en “capas”. El transicional, como indica su nombre, implica una combinación entre el laminar y el turbulento. Y finalmente, el flujo turbulento se refiere a un flujo desordenado en el cual hay una gran cantidad de colisiones y vórtices, por ello su nombre, turbulento. Dentro de la bomba, sobre todo alrededor del agua, el régimen de flujo observado es turbulento. [9]

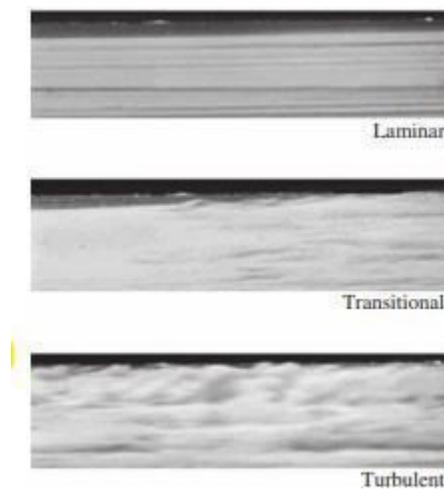


Figura 1.3. Regímenes de Flujo [9]

La figura 1.3 nos muestra de manera visual ejemplos de los 3 tipos de regímenes de flujo, laminar, transicional y turbulento. Se puede apreciar como el laminar es el más ordenado, pues las líneas son prácticamente paralelas, el transicional tiene un poco de caos en su comportamiento mientras que el turbulento es altamente caótico.

## 1.6. Cavitación y Pitting

Para empezar, pitting se refiere a un fenómeno por el cual pequeñas secciones de material son extraídas por pequeñas áreas de erosión, comúnmente asociado con corrosión, lo que deja hendiduras comúnmente redondeadas. [2] Para fines de este proyecto de investigación, pitting hace referencia únicamente al efecto producido por efecto del proceso

de cavitación. La cavitación se refiere a un proceso mediante el cual se generan pequeños espacios donde la presión local es menor a la de vaporización, lo que causa que el agua cambie de estado, o hierva. Esto se puede ver como la generación de burbujas de vapor de agua. Debido a la cavitación, dado el movimiento de las burbujas a regiones de mayor presión a través de los álabes que causa que estas implosionen de manera violenta, causando a su vez un choque de temperatura y presión local, así como una pequeña onda expansiva la cual impacta la superficie de los álabes o la carcasa de la bomba. La exposición repetitiva a estas ondas expansivas puede llegar a desprender pequeñas partes del material de los álabes, resultando en pitting. La cavitación se observa principalmente cuando un cuerpo se desplaza demasiado rápido a través del agua o existe una presión de cabeza muy baja a la entrada de una bomba. La velocidad máxima a la que se puede desplazar un cuerpo dentro del agua es dictada por su geometría y las características hidrodinámicas asociadas a esta. [13]

Este fenómeno, al ser explorado por Niazi et al [14], se muestra como una modificación al entendimiento del flujo dentro de la bomba, gracias a la mezcla de flujos incompresibles y compresibles. Estos autores expresan el cambio como una fuerza inducida por la cavitación a nivel local. Indican a su vez que el cambio de líquido puro a mezcla de líquido-vapor requiere la implementación de una ecuación de transporte de vapores. De modo similar, se menciona que las condiciones de momento se ven modificadas, matemáticamente, por gradientes de viscosidad ocasionadas por los eventos de cavitación.

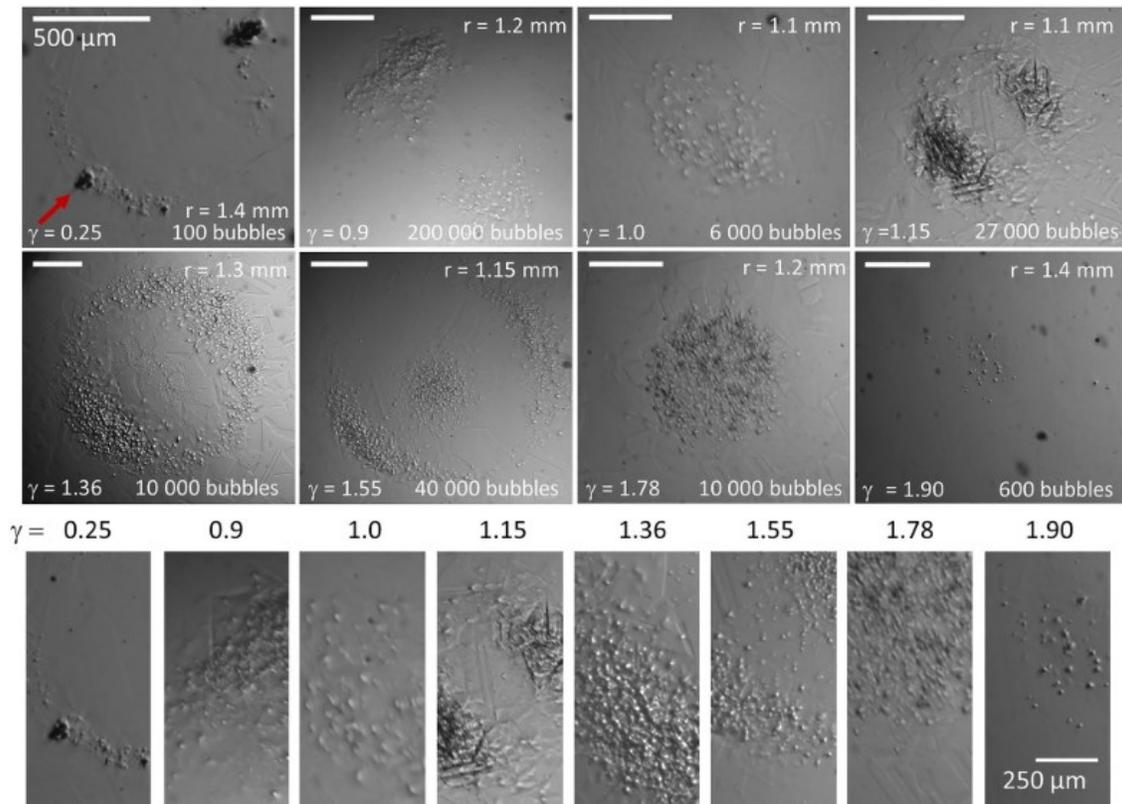


Figura 1.4. Ejemplos de picaduras obtenidos por Kühlmann y Kaiser, donde gamma es la distancia entre la superficie y las burbujas que lo ocasionaron. [15]

La figura 1.4 nos muestra diferentes etapas del efecto del colapso o implosión de burbujas en una superficie metálica. Para fines de la presente, es de interés pues permite observar tamaños de picaduras generadas por cavitación con diferentes valores de  $\gamma$  para el punto de separación de la capa límite de agua sobre la superficie metálica.

## 1.7. Desgaste y Fatiga

El pitting, como se ha observado, es un tipo de desgaste, es decir, un daño gradual que se causa sobre un componente mecánico. Para propósitos de esta investigación, el desgaste se refiere al daño que se causa sobre la estructura que está sometida a cargas, o fuerzas. Si es que una carga se repite una y otra vez en una cantidad de ciclos repetida, se

considera como una carga de fatiga. La fatiga se refiere a un tipo de desgaste causado por cargas repetitivas en direcciones específicas. El desgaste por fatiga puede llegar a resultar en una falla catastrófica, o rotura, del componente analizado. La cantidad de horas que un componente sometido a cargas cíclicas puede resistir este daño se conoce como la vida de fatiga o vida útil, un parámetro importante dentro de esta investigación pues es lo que directamente describe la durabilidad de un componente. [16]

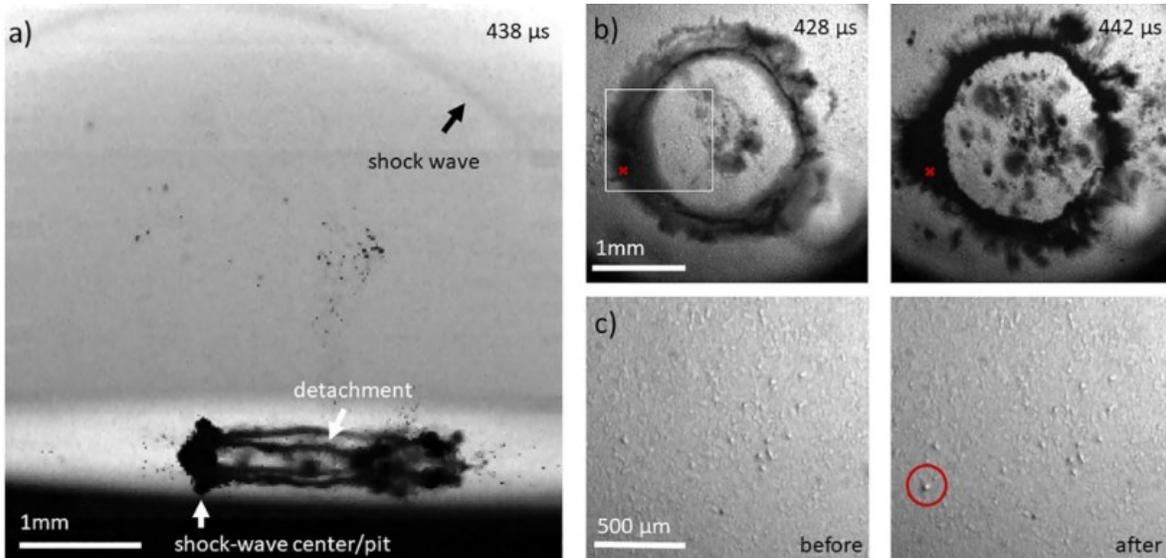


Figura 1.5. Colapso de una burbuja y abolladura que deja sobre una superficie plana en un lapso de 24 microsegundos. [15]

La figura 1.5 muestra una serie de capturas de una burbuja en proceso de colapso con la formación de la onda expansiva asociada con la implosión de la burbuja visible en la subfigura a). Se puede apreciar que esta burbuja dejó una pequeña picadura a raíz de su implosión. Este fenómeno es de interés para esta investigación pues refleja el medio de desgaste que sufren las bombas centrífugas en operación.

## 1.8. CAD y CFD

Además de ello, para fines de este capítulo, se tiene que definir el significado de CAD y CFD. Las siglas CAD del inglés significan “Diseño asistido por computador”, se refiere al

modelado y diseño de soluciones ingenieriles, en este caso un componente, que emplea herramientas computacionales para cálculos, simulaciones y visualizaciones. [17] Las herramientas de modelado por computador son necesarias para esta investigación por el uso de CFD. Las siglas CFD, del inglés, significan dinámica de fluidos computarizada, es decir, simulaciones del comportamiento de fluidos en movimiento mediante el uso de herramientas computacionales. Uno de los usos principales de CFD es el modelado del flujo turbulento, ya que, como se mencionó anteriormente, es caracterizado por la complejidad de las interacciones intermoleculares del fluido. Para poder realizar este modelado, se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales no pueden ser resueltas de manera discreta para condiciones de flujo turbulento. A continuación, se muestran las ecuaciones de Navier-Stokes [9]: ecuación general de continuidad (conservación de masa), conservación de momento lineal, y conservación de energía.

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot V = 0 \quad (1.1)$$

Ecuación de continuidad de Navier-Stokes [9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xx}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{xz}}{\partial z} \right) \right) - \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xx}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{xz}}{\partial z} \right) \right) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Ecuación de conservación de momento en coordenada “x” [18]

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xz}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{yz}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{zz}}{\partial z} \right) \right) \quad (1.3)$$

Ecuación de conservación de momento en coordenada “y” [18]

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xz}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{yz}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{zz}}{\partial z} \right) \right) \quad (1.4)$$

Ecuación de conservación de momento en coordenada “z” [18]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \quad (1.5) \end{aligned}$$

Ecuación de conservación de energía. [18]

Donde:

$\tau$  = Esfuerzos Cortantes

t = Tiempo

$\rho$  = Densidad

$E_T$  = Energía Total

q = Flujo de Calor

Re = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandtl

u, v, w = Componentes del Vector de Velocidad en x, y, z

x, y, z = Coordenadas Cartesianas.

Estas ecuaciones son muy complejas como para ser resueltas a mano para problemas tridimensionales, y por sobre todo problemas con flujo turbulento, como el de esta investigación. Al utilizar CFD, estas ecuaciones son resueltas a través de métodos numéricos, es decir, se emplea el uso de la dependencia temporal de las ecuaciones (gracias a los vectores de velocidad) para poder dar valores de frontera a la energía, velocidad, posición y sus dependientes en una fracción infinitesimal del tiempo. Esto evita el problema de la solución discreta de estas ecuaciones lo que permite que se puedan obtener resultados de simulaciones detalladas y por, sobre todo, simplifican el proceso de cálculo, al investigador o ingeniero, para casos complejos como el de una bomba centrífuga. [8] Para el propósito de esta investigación, el modelo turbulento de elección es el “k-omega SST”. Las siglas SST (en inglés) indican que el modelo se basa en el modelo de turbulencia de “Transporte de Esfuerzos Cortantes de Menter”. Este modelo, implementado por primera vez en 1994 [19], fue elegido para esta investigación pues tanto en el estudio de bombas centrífugas de Ayad Hassan [20] y el artículo de cavitación de Kim [21] se menciona que este muestra buen comportamiento en cuanto a los resultados de CFD aplicado específicamente a turbomáquinas, siendo una bomba centrífuga una turbomáquina.

Así como anteriormente se han presentado las ecuaciones bases del CFD. En el caso de este estudio específico, se incluyen dos ecuaciones utilizadas por Hassan [20] para el cálculo de la eficiencia de una bomba centrífuga, así como el valor del “Net Positive Suction Head” o la altura máxima de aspiración de la bomba. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$\eta = \frac{(p_{t_d} - p_{t_s}) \times Q}{\tau_b \times \omega} \quad (1.6)$$

Ecuación de Eficiencia. [20]

$$H = \frac{p_{t_d} - p_{t_s}}{\rho \cdot g} \quad (1.7)$$

Ecuación de Cabeza. [20]

## 1.9. Pez Vela

El pez vela (*Istiophorus platypterus*), es un animal marino caracterizado por una aleta dorsal que se extiende a lo largo de su lomo, en una forma, valga la redundancia, similar a lo que sería una vela en un barco. Este animal tiene como una de sus características una elevada velocidad de nado, según comentan Sagong et al [3], el pez puede llegar a velocidades en exceso de los 100 km/h. Es este comportamiento final que brinda curiosidad respecto a las características evolutivas del animal para fines del presente estudio. Según comentan estos autores, aún no lograban determinar el rol exacto de las protuberancias en la piel del pez vela, observadas en la figura 1.6, una hipótesis de ello fue que ayudarían a extender la separación de la capa límite sobre el animal para minimizar el daño que pudiera hacerse a las velocidades de desplazamiento que maneja.

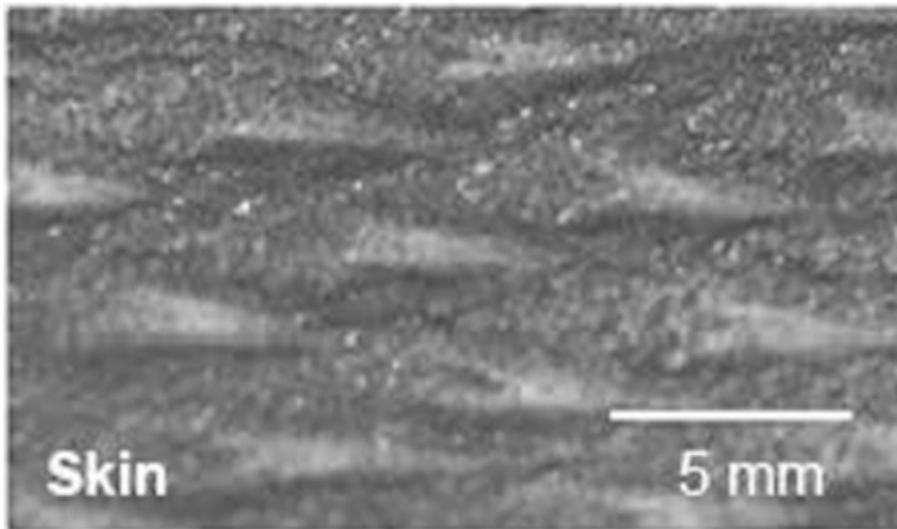


Figura 1.6: Superficie de piel del pez vela, con regla de escala. [3]

La figura 1.6 nos muestra la geometría observada en la superficie de la piel del pez vela, nótese la forma similar a un cuadrilátero triangular, esto, el largo de 5 mm observado, y la distancia entre protuberancias fue tomado como base para el desarrollo de los impulsores empleados en esta investigación.

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

Este capítulo tiene como propósito presentar la información necesaria para contextualizar la investigación en cuanto al tipo de investigación y procedimiento experimental. Primeramente, se explica la caracterización y enfoque que tiene la investigación. Luego siguen las fuentes y técnicas de recolección de información relevantes. Posteriormente, se presentan las variables y el diseño experimental de la investigación. Finalmente, los materiales y el procedimiento detallado para cada parte del proceso del presente estudio.

#### **2.1. Caracterización de la tesis.**

Para poder entender el tipo de investigación que se plantea realizar mediante el presente proyecto de tesis, es necesaria la caracterización de esta. Para este fin, este subtítulo se encuentra dedicado a este propósito. Se abordará la caracterización de la presente mediante el siguiente orden: Finalidad, Enfoque, Alcance, Diseño y Tipo. Sin más preámbulo se prosigue a realizar la caracterización de esta investigación.

##### **2.1.1. Finalidad de la tesis.**

Al empezar por el primer punto, la finalidad de la presente investigación, se considera que esta es una que pertenece a la delimitación de investigación aplicada. Esto se debe a que este proyecto de investigación tiene como fin el aplicar teorías y observaciones de investigaciones previas a la búsqueda de una solución para un problema específico, en este caso el de diseñar una bomba centrífuga con álabes que empleen el uso de diseño biomimético. Además de lo mencionado anteriormente, se conoce que, por definición, una investigación básica es aquella que tiene como fin el producir conocimiento y teorías nuevas,

mientras que la aplicada busca el resolver un problema puntual, como es el caso de la presente [22].

### **2.1.2. Enfoque de la tesis.**

Como siguiente elemento en la caracterización de esta investigación, se prosigue a definir el enfoque. En este caso, la definición del enfoque cuantitativo se observa como aquel que emplea el uso de hipótesis y teoría, utiliza estadística, medidas, es secuencial, analiza la realidad objetiva, y es replicable. Mientras que el enfoque cualitativo es subjetivo, recurrente, carece de secuencia lineal y tiene una gran posibilidad de interpretaciones. [22] Debido a lo anteriormente mencionado, se puede decir que este proyecto de investigación pertenece a un enfoque cuantitativo, principalmente debido al uso del método científico, la búsqueda de una observación objetiva, secuencial y el uso de observaciones de fenómenos para llegar a conclusiones. En resumen, esta investigación tiene enfoque cuantitativo pues es una regida por el método científico y una estructura secuencial.

### **2.1.3. Alcance de la tesis.**

Debido al orden lógico expresado en el primer párrafo, se prosigue a evaluar el alcance de este proyecto de investigación. Según la definición de Hernández Sampieri las investigaciones cuantitativas pueden caer sobre 4 diferentes clases: Exploratorias, Descriptivas, Correlacionales y Explicativas. [22] Esta investigación tiene carácter explicativo, en este caso, se busca evaluar la factibilidad de la aplicación del diseño biomimético aplicado a los álabes del impulsor de una bomba centrífuga. Esta investigación, de este modo, tiene como alcance el proceso de investigación, modelado, simulación y análisis desde la selección del animal a utilizar como base, hasta la evaluación de los resultados de CFD ya validados. En esta investigación, por ende, no se considera el diseño del perfil de álabes como tal, ni el diseño de la voluta de la bomba. Esto último pues, para poder evaluar el efecto del uso de diseño biomimético aplicado en la superficie de los álabes

de la bomba, es necesario tener un punto de comparación. Este punto de comparación es la bomba referencial utilizada por Hassan. [20].

#### **2.1.4. Diseño de la tesis.**

El siguiente componente de la caracterización es entonces el diseño de la investigación. Ya que esta investigación emplea el uso de simulaciones CFD en su proceso de desarrollo, y se está considerando el probar diseños diferentes de impulsor como variable independiente y el propósito de ello es evaluar su efecto sobre las variables dependientes del estudio, esta es una investigación experimental. Esto sigue la definición de una investigación experimental descrita por Hernandez Sampieri [22], pues esta indica que para un experimento se debe de realizar manipulación intencional de variables independientes, en este caso el diseño de impulsores. Asimismo, el autor indica como parte de su definición que todo experimento debe de tener variables de control y validación, así como grupos de comparación y la medida de variables dependientes. El experimento de control es el referencial en base al estudio de Hassan [20], se valida con los datos de referencia, y los grupos de comparación llegan a ser los 3 experimentos de los diseños propuestos. La comparación y medición de variables dependientes es crucial para poder llegar a conclusiones respecto al rendimiento de los diseños propuestos. En síntesis, se considera a esta tesis una investigación experimental según los lineamientos de la definición de diseño de tesis de Hernandez Sampiera.

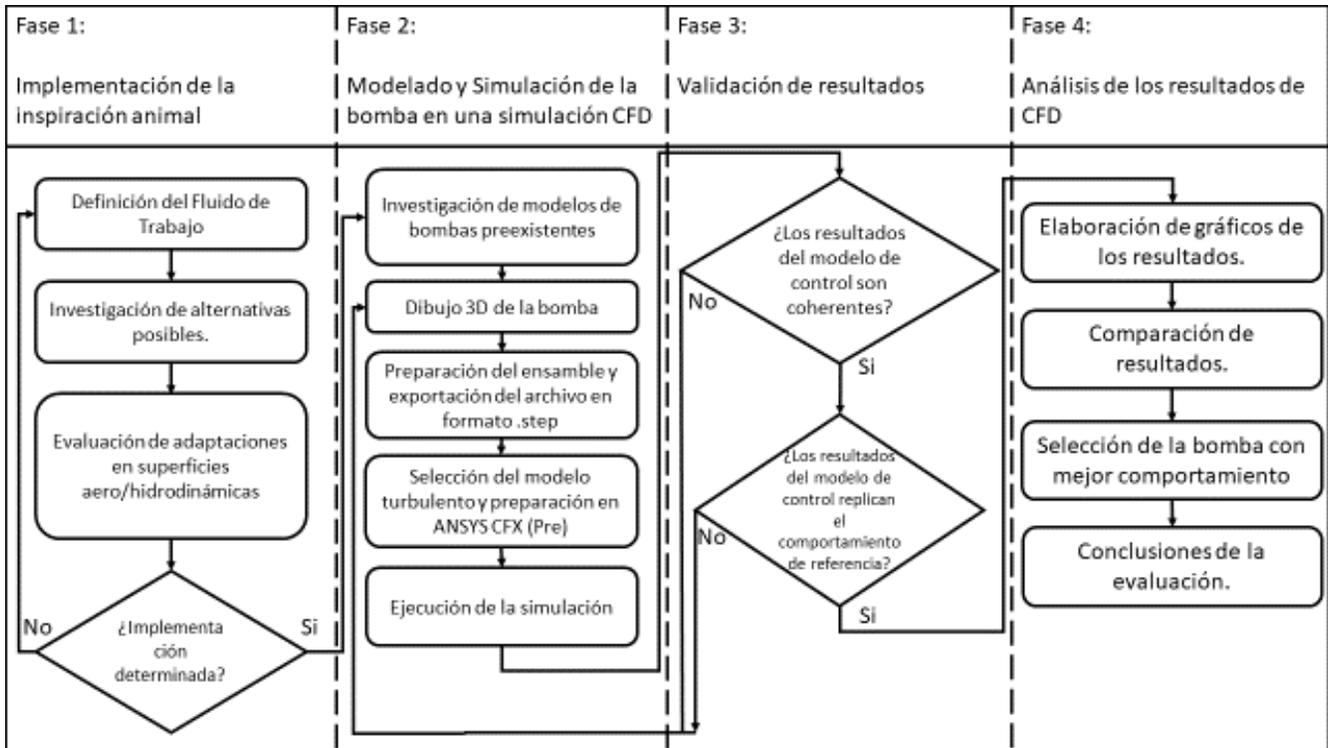
#### **2.1.5. Tipo de tesis.**

Por último, es necesario definir el tipo de investigación. Esta investigación encaja con la definición de experimento puro de Hernandez Sampieri [22]. Esto se debe a que no hay un pre-experimento, únicamente se emplea el uso de los resultados de control como validación, así como modificaciones de 1 variable independiente (diseño de superficie de impulsor), al momento de realizar los pasos experimentales. Evidentemente entonces se considera la

presente investigación como una experimental de tipo experimento puro.

## 2.2. Esquema de la Metodología

Tabla 2.1. Esquema del proceso de investigación.



La tabla 2.1 nos muestra el flujograma del presente estudio. La investigación está dividida en cuatro fases: implementación de la inspiración animal, modelado y simulación de la bomba, validación de resultados, análisis de los resultados. Cada fase está subdividida de tal manera que se sigue el orden lógico del proceso para llegar al resultado parcial de cada fase. La idea detrás de la estructura anteriormente descrita es el poder llegar a cada uno de los objetivos parciales indicados en los títulos de las fases.

### **2.3. Descripción de actividades**

La investigación descrita en el presente documento se basa en el esquema mostrado anteriormente en la Tabla 1. Como se puede observar, la investigación está dividida en 4 fases principales, las cuales abordan la resolución de los objetivos que fueron planteados en un inicio. El proceso general se muestra en esta tabla, dando por inicio con la selección de la inspiración animal, y finalizando con el análisis de los resultados de simulación por CFD. Debido a los tipos de herramientas utilizadas para el desarrollo de esta, en su mayoría kits de software, se empleó el uso de un computador de escritorio utilizando Windows 10 versiones (21H2) como base para esto.

La explicación del desarrollo de las distintas fases de la investigación, tal y como se observaron en la Tabla 1, se da a continuación, en el orden indicado, es decir: Selección de inspiración, Desarrollo del modelo, Validación de Resultados, Análisis de los resultados en CFD.

#### **2.3.1. Fase 1: Implementación de la inspiración animal**

La selección de la fuente de inspiración es una fase meramente exploratoria en la que mediante la consulta bibliográfica en torno al comportamiento hidrodinámico de varias especies se llega a una serie de observaciones sobre las cuales se definen dos puntos importantes. El primero es validar que la adaptación documentada en investigaciones previas es prometedora para aplicaciones en hidrodinámica, y el segundo de estos es la viabilidad de aplicar esta adaptación dentro de las limitaciones dimensionales de una bomba centrífuga.

Para poder cumplir con el proceso descrito en el párrafo anterior, se debe definir una serie de restricciones para el estudio, con énfasis en la aplicación buscada. Se prioriza literatura que contenga información con respecto a las características hidrodinámicas de los especímenes observados. Así mismo, se requiere tomar en consideración la complejidad de

la adaptación observada, pues se deben considerar las limitaciones del enmallado CFD disponible. Al definirse esto se debe de realizar un concepto base de cómo adaptar la adaptación a un modelo en CAD.

#### **2.3.1.1. Definición del Fluido de Trabajo**

El fluido de trabajo será definido en base a consideraciones de limitaciones de simulación, equipo (tipo de máquina), y posibilidad de realizar futuras pruebas en laboratorio. Para esto se debe de considerar lo siguiente: Se emplea una licencia estudiantil de ANSYS para la simulación en CFD, se plantea desde un inicio realizar el diseño de una bomba centrífuga, y se debe de trabajar con un fluido seguro y de libre acceso para un investigador civil.

#### **2.3.1.2. Investigación de alternativas posibles**

La investigación en cuanto a alternativas posibles para la fuente de inspiración animal se llevará a cabo mediante el uso de dos herramientas: La lluvia de ideas, canalizada a través de una matriz morfológica, y revisión de fuentes bibliográficas. Esta etapa depende de las consideraciones definidas en la anterior, por lo que prima la búsqueda de especies que se hayan adaptado a un entorno similar al que se desea simular, en base al fluido de trabajo. El fin de realizar esta etapa es definir una serie de candidatos para realizar una comparación cualitativa en la que se pueda definir la base sobre la cual el diseño toma forma. Es necesario determinar el aspecto principal de cada alternativa en esta etapa.

#### **2.3.1.3. Evaluación de adaptaciones en superficies Aero/hidrodinámicas**

El fin de este paso es brindar las bases sobre las cuales se podrá seleccionar la adaptación animal para el diseño propuesto. Este proceso consta meramente de revisión bibliográfica sobre la cual se consideran las conclusiones de los investigadores en cuanto al

rol de las distintas adaptaciones, y su efecto en la locomoción del animal en cuestión. Esto, en conjunto a la descripción más precisa con respecto a su complejidad geométrica permite tener las limitaciones requeridas para poder tomar una decisión al respecto.

#### **2.3.1.4. Implementación final de la adaptación.**

Este segmento tiene como fin el realizar la definición del modo en que se implementará la adaptación para las simulaciones. En base a lo observado en el paso anterior, se define una adaptación para evaluar y se finaliza el descarte de las otras opciones. Se expresa entonces la decisión tomada en una matriz morfológica. Posteriormente, se toman medidas en base a referencias que sirven de unidad geométrica para añadir al diseño a investigar. Será determinante el tener dimensiones de la adaptación en cuestión y su ubicación idónea en un equipo.

#### **2.3.2. Fase 2: Modelado y Simulación de la bomba en una simulación CFD.**

Como objetivo específico siguiente, tenemos el objetivo de realizar el modelado en CAD. Este es un objetivo que se puede subdividir en las siguientes actividades: Modelado inicial, Realización de simplificaciones, Optimización del modelo para CFD y búsqueda y elaboración del modelo convencional para la comparación. El modelado inicial hace referencia a la actividad de realizar el dibujo del componente deseado, los álabes, en CAD utilizando la geometría deseada tal y como se conceptualizó al momento de querer replicar la adaptación natural. Esto da como resultado un modelo que puede llegar a tener geometrías de alta complejidad y pequeños desperfectos que podrían causar una falla de simulado, ya sea en el software CAD o en el software de CFD.

### **2.3.2.1. Investigación de modelos de bombas preexistentes**

El propósito de esta sección es el obtener una serie de modelos referenciales con información respecto a los parámetros de operación necesarios para poder validar nuestra simulación. Este paso se realiza mediante la consulta de fuentes bibliográficas, con énfasis en hallar estudios que tengan resultados experimentales en cuanto a eficiencia, caudales de prueba, NPSH (o alturas/presiones diferenciales en su defecto). Con esta información se selecciona el modelo a utilizar en base a los criterios mencionados en la sección anterior, referentes a las limitaciones del software.

### **2.3.2.2. Dibujo 3D de la bomba**

En esta sección, se tiene como objetivo el tener el modelo de las partes de la bomba para ser ensamblados y transferidos al software de simulación a utilizar. Se emplea el uso de software CAD dependiendo de la geometría diseñada. Para fines de este estudio, se realizó el modelado usando una combinación de SolidWorks y Autodesk Inventor. El uso de cada software se definirá en base a lo observado al momento de modelar la voluta de la bomba.

### **2.3.2.3. Preparación del ensamble y exportación del archivo en formato .step**

De manera similar al paso anterior, el propósito de este paso es el tener el producto final que puede ser utilizado por el software ANSYS. Para ello se emplea el uso de Autodesk Inventor para fijar todas las partes de la bomba en un solo componente final, el cual al tener ensamblado y unido de manera correcta, debe de ser exportado como un archivo de formato .step. El uso de los archivos .step se basa en el hecho que la mayoría de formatos de archivo de modelo 3D son propios de los kits de software que se utilizan. El .step es un tipo de archivo estandarizado (ISO 10303-21) que se puede emplear a través de múltiples kits de software.

#### **2.3.2.4. Selección del modelo turbulento y preparación en ANSYS CFX (Pre)**

Esta sección tiene como objetivo seleccionar el tipo de modelo de turbulencia adecuado para resolver lo propuesto. La selección del modelo se hace en base a la revisión bibliográfica de la información disponible acerca de bombas centrífugas y los caudales que se piensan observar. La preparación del modelo en ANSYS CFX implica el importar el modelo a ANSYS CFX, realizar el enmallado (procurando tener buena densidad de nodos en los puntos de mayor interés), configurar el ensayo en la sección Pre del sistema, y validar que todos los elementos del sistema hayan convergido de tal manera que se pueda ejecutar la simulación como tal. Este último punto es bastante importante, pues puede llevar a volver a realizar el modelado de la bomba si los errores son muy críticos.

#### **2.3.2.5. Ejecución de la simulación.**

Como indica el nombre de la presente sección, el propósito de esta es el asegurar que se ejecute la simulación como tal. Este paso implica monitorear los gráficos de convergencia de variables en la ejecución de los cálculos. Debido a las limitaciones del modelo como tal, es posible que la convergencia nunca llegue a los valores ideales, sin embargo, una estabilización de convergencia en el tiempo indicaría que la solución se ha aproximado lo suficiente como para poder ser considerada como válida. En caso los valores no converjan en lo absoluto, o no se pueda ejecutar la simulación como tal, es necesario realizar un proceso de diagnóstico de problema, el cual puede retroceder el procedimiento hasta el paso descrito en el punto 2.3.2.2.

### **2.3.3. Fase 3: Validación de los resultados**

Si se sigue el orden lógico observado en el gráfico de flujo de la presente investigación, el siguiente paso no solo ha de ser la validación de los resultados de la simulación por CFD, sino que el objetivo de este paso ha de buscar el verificar que los resultados obtenidos sean coherentes y con suficiente precisión como para tomar el punto de

control como base de parámetros del resto de simulaciones.

En este paso se valida si la simulación corrió en primer lugar. Posibles motivos para la falla de una simulación pueden ser: falla en el enmallado, errores en la configuración de los parámetros y condiciones de frontera, errores en modelado, etc. Cada uno de los diferentes posibles errores en el proceso hasta el momento en que se ejecuta este paso tiene un diferente comportamiento, por lo que es importante que el investigador sea capaz de realizar el “troubleshooting” requerido para proseguir, esto es similar a lo indicado en el punto 2.3.2.5. Una vez se resuelvan los inconvenientes asociados a la ejecución de la simulación como tal, es necesario que se evalúe la convergencia de variables sobre tiempo. Para fines de esta investigación, dada nuevamente la limitación de la precisión del enmallado por la licencia estudiantil del software ANSYS. En este sentido, no se espera que los resultados puedan tener el nivel de convergencia que presenta lo simulado por Hassan, no obstante, este mismo estudio sirve de punto de comparación para la simulación de control.

Para la validación como tal de los valores de simulación es necesario tener 2 juegos de valores: Los valores de la simulación de control (bomba normal, a 1.5L/s, 3.5 L/s y 5.5 L/s). El propósito de este último paso es el tener un punto de comparación que permita comprobar los resultados sin haber podido tener un experimento en físico. Las simulaciones, por su naturaleza digital, no garantizan que los resultados sean coherentes, por lo que el valor de control es tan importante. Sin poder realizar la comparación de control, es imposible validar los resultados obtenidos.

Para efectos del resto de la investigación, se consideran válidos los resultados obtenidos de las bombas alternativas siempre y cuando su comportamiento de convergencia de simulación sea similar al valor de control, con un orden de cálculo temporal similar, así mismo, se considerará el mismo orden de magnitud para el error posible obtenido comparándose con la bomba referencial.

#### 2.3.4. Fase 4: Análisis de los resultados de CFD.

El objetivo principal de esta fase es realizar, por falta de otro término, el análisis de los resultados validados en la anterior fase. Como punto de arranque para esta fase, se debe de emplear como referencia los resultados del experimento de control, el cual fue validado en el paso anterior. Este experimento de control se emplea como base de comparación con los resultados de los experimentos de los impulsores propuestos. La idea detrás de esto es poder realizar una comparación exhaustiva del rendimiento de los diferentes impulsores en términos de las variables de estudio.

En primer lugar, se procede a observar el patrón de comportamiento de las diferentes variables gráficamente, es decir, de la presión y velocidad local. La eficiencia y NPSH son formuladas de la misma manera que empleo Hassan [20] por lo que no se extraen de la manera descrita anteriormente. Al realizarse la observación del patrón de comportamiento de presión y velocidad local se observan los puntos en donde se forman áreas con caídas de presión y zonas donde la velocidad tiende a 0. El identificar estas zonas es crucial para poder extraer los valores de presión y velocidades mínimas en el dominio del impulsor.

Al tenerse en cuenta lo indicado en el párrafo anterior, se procede a extraer y procesar la data obtenida de los diferentes experimentos. Cada experimento consta de 9 simulaciones, 1 por cada punto de muestreo con caudal de entre 1.5 L/s a 5.5 L/s, con una separación de 0.5 L/s entre tomas. De cada simulación se extrae el cálculo de eficiencia y NPSH provenientes de los monitores de ANSYS CFX. En estos se pueden observar los valores de convergencia de residuales de la simulación, así como los valores calculados por el programa. Para los valores máximos y mínimos de presión y velocidad local, se observan las regiones descritas en el párrafo anterior y se busca manualmente el punto que presente los valores de extremo indicados. Por cada valor extraído, se tabulan en un cuadro que clasifica los resultados en términos del impulsor fuente y el caudal al que se midió el valor.

Una vez se haya finalizado la tabulación de datos, se grafican curvas en base a los puntos obtenidos. Estas curvas se formatean de tal manera que sea fácil identificar cada curva asociada a un impulsor, y son el punto de inicio para la comparación de resultados.

La comparación de resultados, tal y como se indica, es un proceso en el cual se evalúan las tendencias de comportamiento asociadas a cada curva de impulsor simulado, lo que permite obtener una lista de ventajas y desventajas asociadas a cada uno, en términos de rendimiento. En base a esto se procede a realizar la selección del modelo propuesto considerado como aquel con rendimiento superior. Este último se compara nuevamente con el modelo referencial para poder determinar si es que esta aplicación se muestra prometedora o no.

Finalmente, se tiene la emisión de conclusiones de lo observado a lo largo de la investigación. Esta parte de la fase final debe englobar todo lo ejecutado en el proceso de investigación, así como resumir lo más crítico de cada una de las fases de la presente investigación.

#### **2.3.4.1. Elaboración de gráficos de los resultados**

Este paso tiene como objetivo el desarrollo de las ayudas gráficas requeridas para poder realizar la comparación del rendimiento de las bombas. Esto implica el tabular los valores de las diferentes variables de estudio (eficiencia, NPSH, presiones máximas y mínimas al interior del dominio del impulsor, velocidades máximas y mínimas al interior del dominio del impulsor) manualmente en una hoja de cálculo, utilizando los valores obtenidos del software ANSYS CFX. Se requiere tabular los valores para cada punto de caudal de acuerdo a lo definido anteriormente (de 1.5 L/s a 5.5 L/s con intervalos de 0.5 L/s). Esto se debe de repetir para los 4 impulsores a comparar, el referencial, geometría modificada en la superficie del lado de succión, geometría modificada en la superficie del lado de descarga, y

geometría modificada en ambos lados. Los gráficos seleccionados han de ser los mejor adaptados a fines de caracterizar el comportamiento de una bomba.

#### **2.3.4.2. Comparación de resultados**

El objetivo del presente paso es realizar la comparación de los 4 ensayos realizados en términos del rendimiento. En este sentido, se emplea el uso de las visualizaciones creadas en el paso anterior, utilizando las métricas obtenidas para las variables dependientes: Eficiencia, NPSH, Presión Local, y Velocidad Local. En base a estas visualizaciones se debe determinar qué equipos presentan los puntos de mayor rendimiento, para cada variable, en términos del caudal y el impulsor selecto. El fin de esto es poder evaluar las tendencias que muestran los gráficos y determinar los beneficios y/o lo desfavorable que puede llegar a ser un diseño propuesto.

Tomando en consideración lo mencionado líneas arriba, una comparación del rendimiento observado entre los diferentes diseños propuestos se vuelve fundamental para la evaluación de estos. Esto último, pues rige el descarte de aquellos propuestos que hayan presentado un peor rendimiento bajo los criterios de la presente investigación. De esta manera, es evidente que el presente paso es fundamental para la ejecución del siguiente y que ambos se encuentran entrelazados.

#### **2.3.4.3. Selección de la bomba con mejor comportamiento**

Una vez finalizado el proceso de comparación entre los diferentes casos simulados, se debe de realizar la selección de un ejemplar con rendimiento superior a los anteriores para realizar una comparación con el modelo de referencia bajo los criterios establecidos en esta investigación. Para ello, la selección del ejemplar que muestre mejor rendimiento, desde el punto de vista de las curvas de rendimiento bajo los diferentes parámetros evaluados (NPSH, Eficiencia, presiones y velocidades locales). La lógica detrás de incluir este paso como parte de la investigación yace en el hecho que el modelo referencial sirve de eso, una referencia.

Es necesario poder observar las posibles ventajas y desventajas que traen los diseños propuestos en esta investigación contra un diseño convencional. Este paso se encuentra separado del resto de la comparativa pues implica el definir los diseños que han de ser descartados en base a lo expuesto en la investigación.

En este sentido, la lógica detrás de la selección de bomba yace sobre la necesidad de buscar aquella bomba, entre las 3 modificadas, que presente el mejor comportamiento de acuerdo a lo observado en la etapa de comparación de rendimiento. Aquella bomba o bombas que hayan demostrado tener la curva de rendimiento que consideremos pueda presentar mejoras respecto al modelo referencial entonces son seleccionadas como ejemplos de posibles rutas de mejora del rendimiento de estos equipos.

El objetivo del presente paso entonces es el definir cuál impulsor presenta las mejores características de rendimiento global en cuanto a lo observado durante los pasos anteriores de la fase actual así como el realizar una comparación final entre el elegido y el referencial. Para poder finalizar este paso, es necesario que se tenga una relación porcentual entre el rendimiento del impulsor seleccionado en cada uno de los parámetros tomados anteriormente, con el valor referencial como base. En base a esto, se procede a realizar la comparación final. Esta comparación determina la región de operación en donde el impulsor seleccionado presenta un rendimiento superior al referencial, y aquellas en donde es igual o inferior en rendimiento, considerando al rendimiento como el comportamiento del impulsor respecto a las variables de estudio.

Al finalizar la comparación final y haber definido tanto el diseño seleccionado, así como el rendimiento en relación al impulsor referencial, se tiene suficiente información como para poder realizar conclusiones al respecto de los impulsores propuestos.

#### **2.3.4.4. Conclusiones**

Este paso tiene como objetivo el presentar la síntesis de lo observado en la investigación. Se considera como finalizado una vez se muestre esta síntesis en torno a los objetivos específicos delimitados al inicio de la investigación.

#### **2.3.5. Variables de la investigación**

Las variables que representan el fundamento de la investigación se encuentran relacionadas directamente a la mecánica de fluidos. En específico, es importante tomar en cuenta las siguientes: Geometría superficial de los álabes, velocidad local, presión local, velocidad y posición de las diferentes partículas de agua al interior de la bomba. Es de interés mayor el comportamiento de estas variables dentro de la capa límite y el punto de separación de fluido. La primera variable es la que va a servir de variable independiente a través del proceso experimental de esta investigación. Esta varía de impulsor a impulsor, pues se está cambiando de superficies que son consideradas como lisas para simulación, a superficies con protuberancias de 0.25 mm de altura. El resto de las anteriormente mencionadas son las variables dependientes de la inicial. Las condiciones de frontera de bombeo, es decir, el flujo volumétrico (rango establecido de 1.5 a 5.5 L/s), presión de entrada (1 bar), velocidad angular del rotor y las dimensiones generales de la bomba serán variables de control, estáticas, las cuales provienen de estudios realizados por otros investigadores, para poder validar la simulación con datos experimentales.

Estas variables fueron definidas en parte en base a los textos de mecánica de fluidos y la investigación de Hassan [20]. Los valores de entrada del flujo volumétrico, presión en la succión y condiciones ambientales del fluido (viscosidad, temperatura, etc.) fueron determinados de la simulación referencial de Hassan [20]. Ya que es necesario validar los resultados obtenidos, se utilizaron ambas variables principales de su investigación, Eficiencia y Altura de cabeza (NPSH). Se puede visualizar lo mencionado en la siguiente figura:

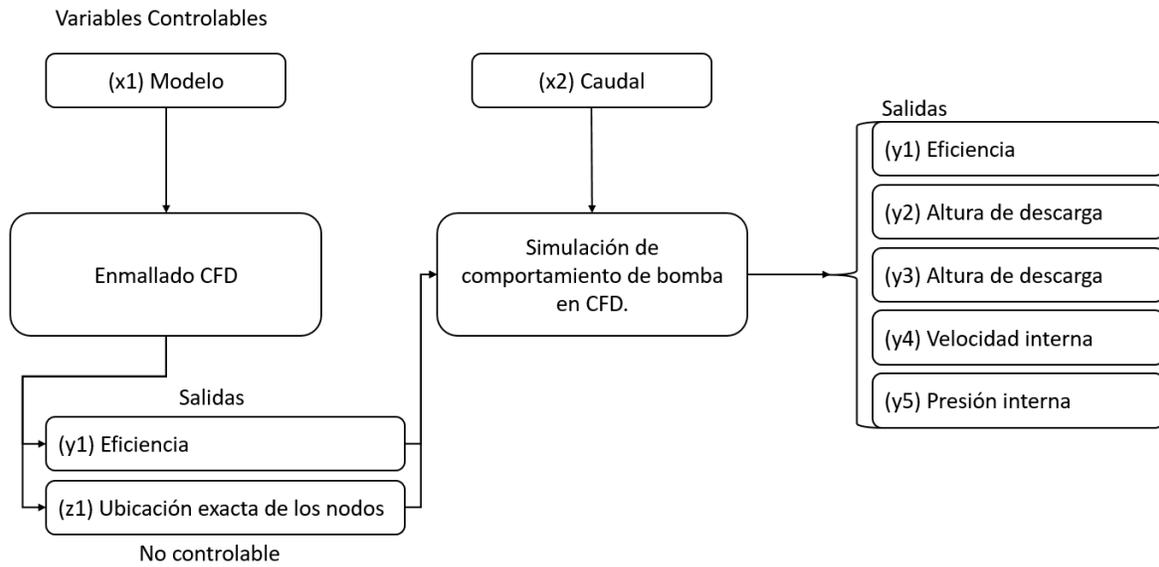


Figura 2.1: Diagrama de variables controlables, entrada y salida de la simulación CFD.

## 2.4. Equipos y Software

A continuación, se presentan los equipos y herramientas digitales que se consideraron necesarios para poder realizar la presente investigación. Se describen las características e información principal para cada uno.

### 2.4.1. Autodesk Inventor 2018

Autodesk inventor es un kit de software de modelado tridimensional desarrollado por Autodesk. Este software es necesario para poder convertir el concepto de una bomba a un modelo 3D con formato .step, el cual es necesario para poder realizar la simulación por CFD. [23]

### **2.4.2. ANSYS - CFX**

ANSYS CFX es un paquete de software que permite la simulación de turbomáquinas desarrollado por la empresa ANSYS. [24] Este kit de software es considerado como uno que se presta de buena manera para esta investigación, gracias a comparaciones previas de los resultados de simulación contra resultados experimentales de las bombas centrífugas por Kim [21] y Hassan [20].

### **2.4.3. Computador de escritorio**

Como se ha mencionado anteriormente, al realizar el uso de kits de software principalmente, es necesario el uso de un computador capaz de utilizar ambos kits de software. Para este propósito, una computadora personal de Windows 10 (versión 21H2, arquitectura x86-64) fue empleada a lo largo de esta investigación. Se mencionan la versión y arquitectura del sistema operativo a fin de minimizar la variabilidad en simulación que pueda ser introducida por versiones más recientes de software.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

El foco de este capítulo es la presentación y análisis de los resultados obtenidos a lo largo del proceso de ejecución de este proyecto de investigación: investigación, selección de parámetros y ejecución de simulaciones. Para considerar cada paso como exitoso, es necesario que se obtengan los resultados clave requeridos para que sirvan de entrada en los subsiguientes. Para ello, se sigue la estructura descrita en el capítulo de metodología, es decir se empezará por la selección de la inspiración de evolución animal para el diseño de la bomba. Sigue el proceso de modelado 3D, junto a la simulación de la mecánica de fluidos.

#### **3.1. Implementación de la inspiración animal**

Al haberse determinado una fuente de inspiración animal para el desarrollo de la investigación, es importante haber determinado la manera en que esta tomará forma en términos de aplicación. A continuación, se muestra la lógica y restricciones asociadas a la implementación de la inspiración animal aplicada a los álabes, es decir, la replicación de la piel del pez vela.

##### **3.1.1. Definición del fluido de trabajo e Investigación de alternativas posibles**

Para fines de la presente investigación, es necesario definir el porqué del uso de la piel del pez vela como base de adaptación animal para utilizarse en el impulsor de una bomba centrífuga. Al inicio de esta investigación mencionó que las bombas centrífugas están presentes en aplicaciones de transporte de líquidos. Asimismo, el ámbito de aplicación será en torno al agua. Por ello todos los animales investigados en el proceso de selección son animales marinos. El alcance de la investigación se restringe a animales y no plantas submarinas debido a la búsqueda de posibles adaptaciones que mejoren el movimiento veloz a través del agua. Entre los animales investigados, resaltaron la ballena jorobada, el delfín

común, el pez espada, pez vela y el tiburón. Este último fue tomado únicamente de referencia pues ya se han hecho investigaciones de la aplicación de los dentículos de la piel del tiburón a aplicaciones de ventiladores y bombas. [2] Es más, el proceso de selección se vio guiado por un énfasis en minimizar la eventual complejidad de fabricación de una bomba que emplee un diseño como este. Tanto el delfín como el pez espada se mostraron optimizados para alta velocidad de nado a través de piel extremadamente suave o lubricada.[3][25] El pez vela muestra tener pequeñas protuberancias en su piel, que parecen crear surcos para guiar el agua sobre esta [3]. Por último, se muestran las aletas de la ballena jorobada, las cuales presentan protuberancias, llamadas tubérculos. [26] Es destacable mencionar que los animales en cuestión presentan velocidades de nado bastante altas, en el caso del pez vela, estas superan los 100 km/h.

Al tener en cuenta lo mencionado anteriormente, es importante considerar que de todas las adaptaciones mencionadas, solamente pueden ser aplicadas la piel del pez vela, los dentículos del tiburón, y los tubérculos de la ballena jorobada. Esto se debe a que el pez espada y el delfín emplean lubricación activa sobre la superficie de su piel, algo que podría implicar incompatibilidad de flujo entre el fluido de trabajo y el lubricante.

### **3.1.2. Evaluación de adaptaciones en superficies aero/hidrodinámicas.**

En el inciso anterior, se mencionan las adaptaciones de varios animales. Para poder aplicar estas en la investigación se procede a restringir y seleccionar aquellas que mejor encajen con el propósito de la investigación. Como se indicó anteriormente, se descartaron el delfín y pez espada. La adaptación de la ballena jorobada ha sido empleada en aplicaciones con flujo abierto, en donde se muestra como prometedora para fines de una bomba de flujo axial, no necesariamente una bomba centrífuga. Por ello, se decide emplear la superficie de la piel del pez vela aplicada a los álabes de una bomba centrífuga.

Considerando que se ha determinado la piel del pez vela como adaptación ejemplar para esta investigación, queda como pregunta, el modo en que se adaptará lo observado a un diseño propuesto. Para ello, se basa la forma general de las protuberancias que se aplicarán sobre los álabes en torno a las tomas de magnificación realizadas por Sagong [3]. Estas se pueden apreciar en la figura 1.6. Las protuberancias son intercaladas, tienen forma de cuadrilátero triangular con 5mm de largo, y tienen una altura que ha de rondar alrededor del milímetro, en base a lo observable en fotos.

## Modelado CAD

### 3.1.3. Investigación de modelos de bombas preexistentes

Para esta sección de la investigación fue crucial el encontrar artículos científicos, donde se aplicará CFD a una bomba centrífuga convencional. Por ello, los artículos de Niazi, Hassan y Kim fueron de bastante interés. [14][20][21] Algo que cabe destacar sobre estos últimos dos, es que presentan los planos de la bomba que emplearon en sus simulaciones, algo indispensable para este proyecto. Estos se muestran a continuación:

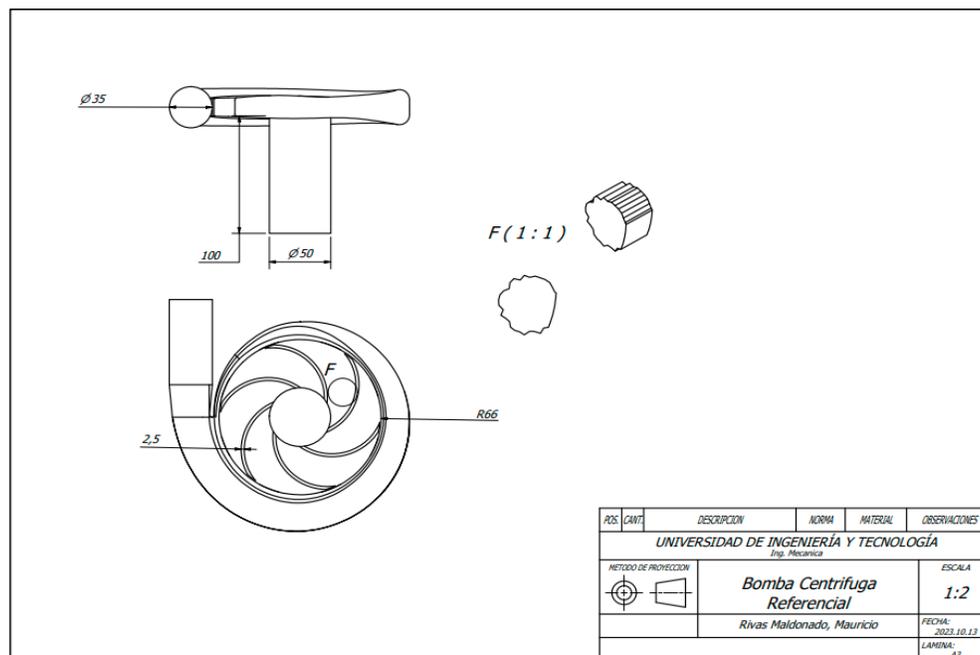


Figura 3.1: Dimensiones del impulsor utilizado por Hassan [20]

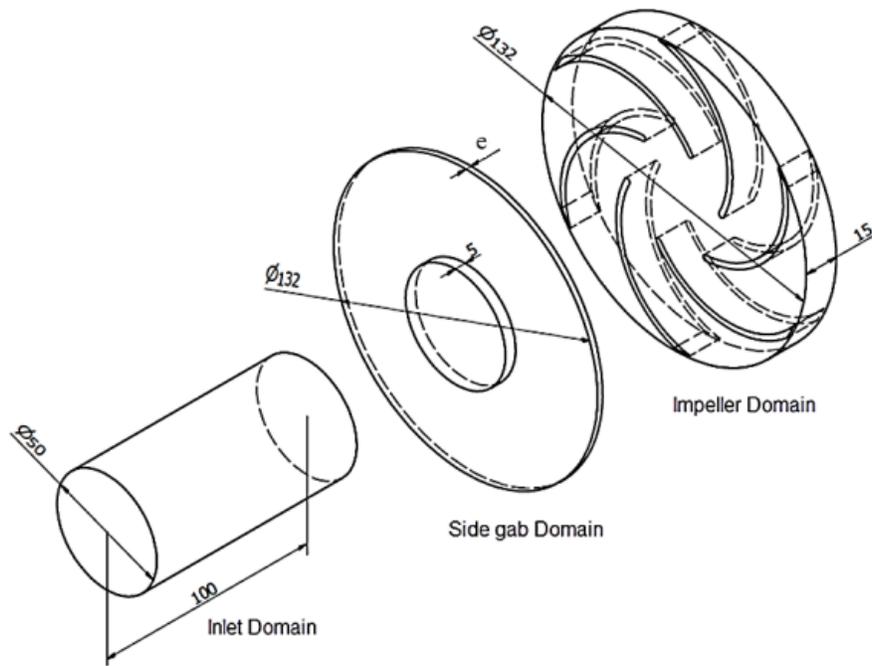


Figura 3.2: Dimensiones de los componentes del dominio de la bomba de Hassan [20]

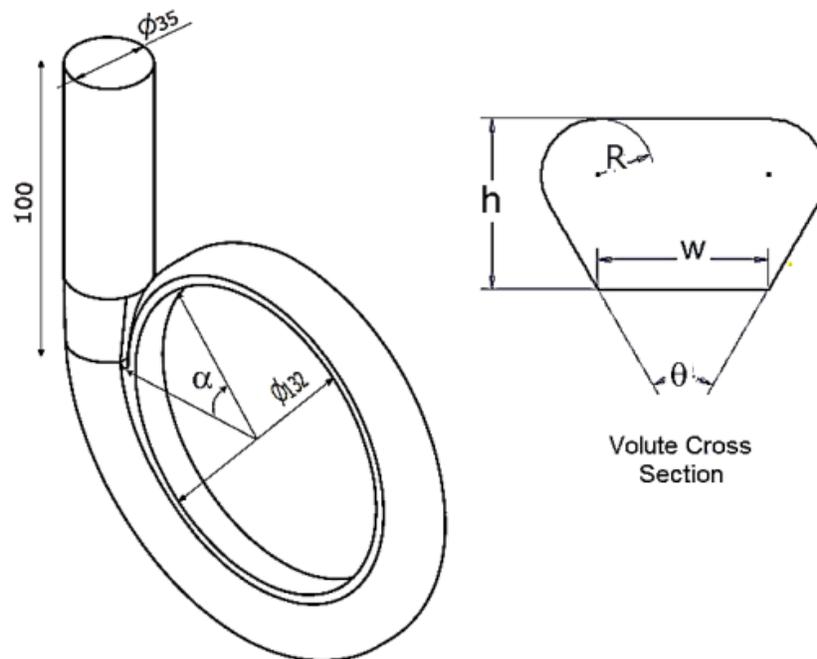


Figura 3.3: Dimensiones del dominio de la bomba de Hassan [20]

Las dimensiones de la Figura 8 se encuentran en la siguiente tabla, extraída de la tesis de Hassan [20].

Tabla 3.1: Dimensiones del dominio de la bomba de Hassan [20]

Número de Sección	$\alpha$ (grados)	h (mm)	R (mm)	W (mm)	$\theta$ (grados)
1	45	5	2	15	20
2	90	11	3		30
3	135	15	5		40
4	180	19	8		50
5	215	23	10		60
6	270	27	12		70
7	315	28.5	13		80
8	360	30	15		80

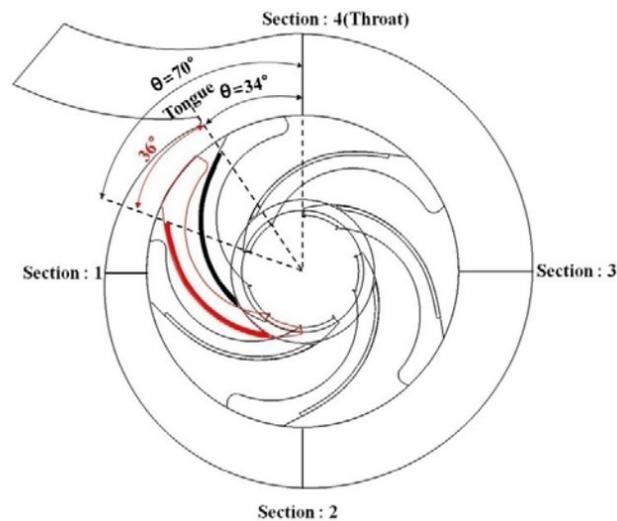


Figura 3.4: Dimensiones del dominio de la bomba de Kim [21]

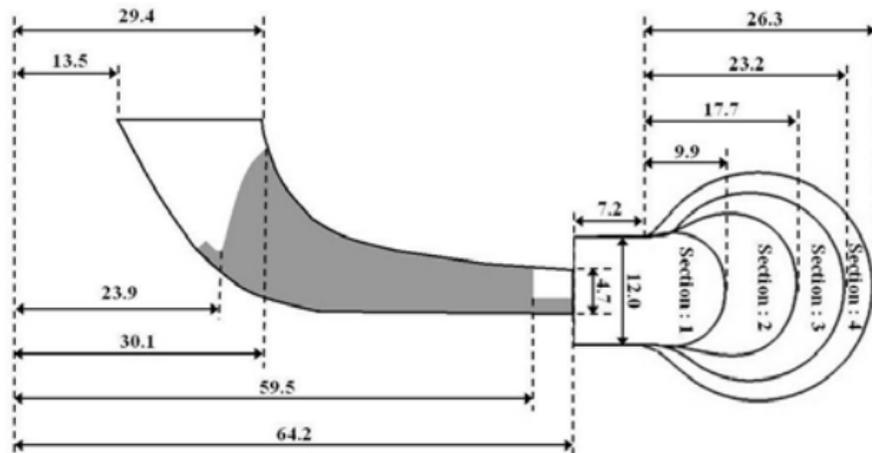


Figura 3.5: Parámetros de los álabes y dominio de la bomba de Kim [21]

El modelo empleado para el propósito de esta investigación es entonces la bomba de Hassan, no solo por el detalle de todos los componentes de su bomba, sino que este autor incluye en su metodología de investigación los parámetros empleados en su simulación exitosa de la bomba centrífuga (función de eficiencia, NPSH, flujo másico, presión de entrada y velocidad angular).

### 3.1.4. Dibujo 3D del conjunto impulsor - bomba.

Para el modelado en CFD se requiere que modelemos el espacio ocupado por el agua dentro de la bomba, en vez de la estructura de la bomba en sí. Por ello, observamos a continuación los componentes de la bomba siguiendo el diseño utilizado por Hassan.

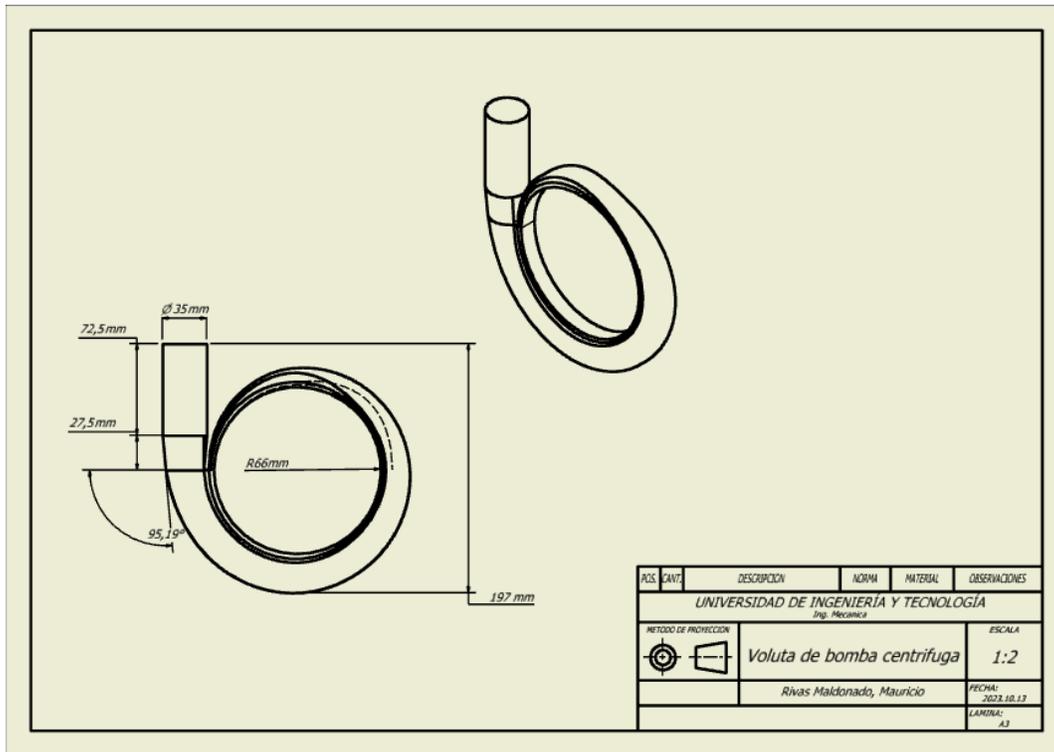


Figura 3.6: Voluta de la bomba.

La figura 3.6 muestra la región de revolución de la voluta de la bomba, es decir, el área de la bomba entre el impulsor y la descarga. Nótese la circunferencia con incremento gradual en esta. Las dimensiones referenciales para la descarga, y las diferentes secciones de la geometría incremental se basaron en lo utilizado por Hassan [20] al ser aquel el experimento de control para el presente estudio.

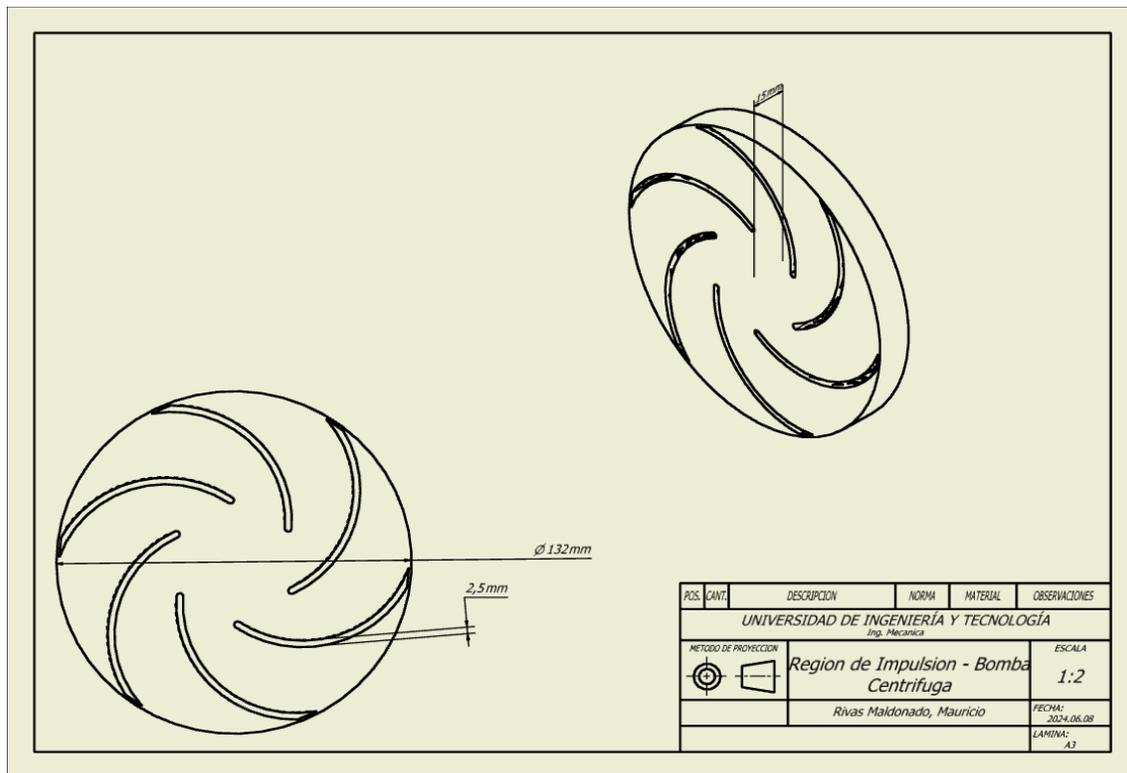
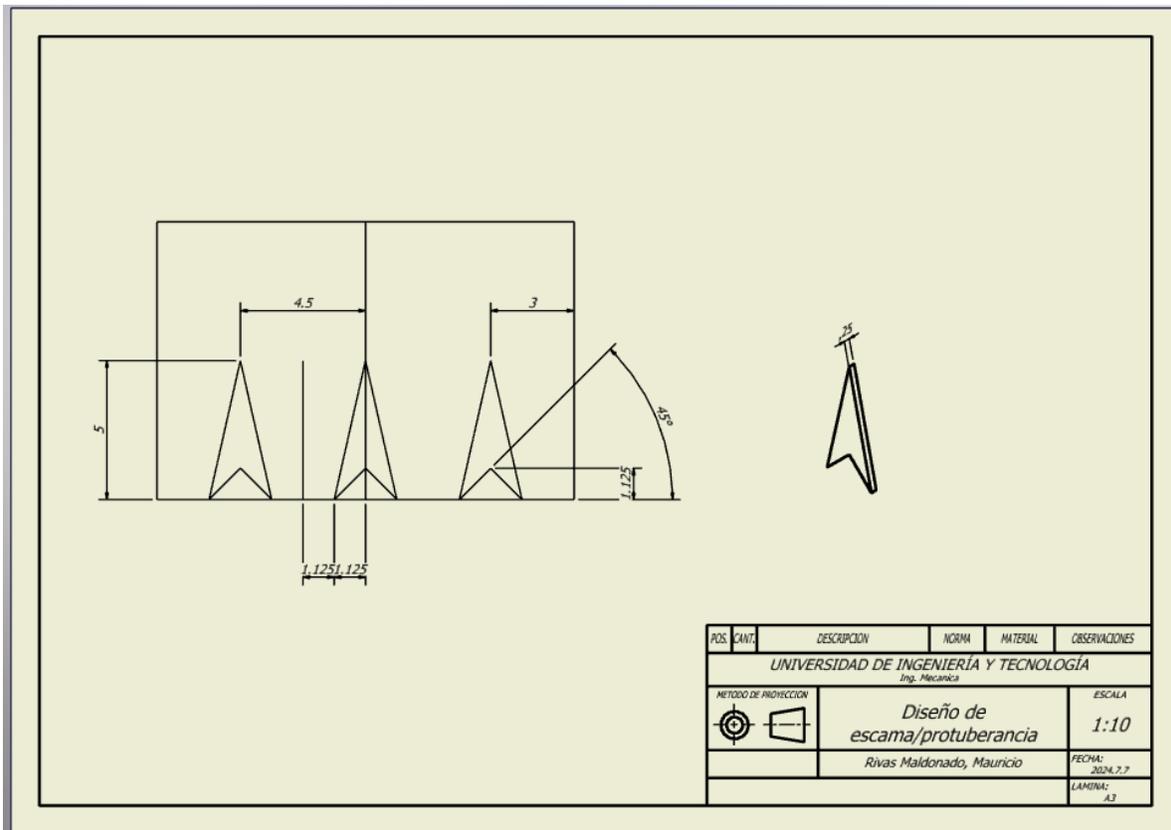


Figura 3.7: Área de revolución o impulsor de la bomba.

La figura 3.7 muestra uno de los impulsores empleados en las simulaciones, el propósito de la figura es mostrar la configuración general empleada en cada uno de los impulsores. Es decir, impulsores semi-abiertos de 7 alabes, cada uno de estos con 2.5 mm de espesor, para un diámetro de impulsor de 132 mm, y un ancho de 15 mm.



### 3.8 Escama referencial y distribución base.

La figura 3.8 nos muestra las dimensiones de la geometría referencial de las estructuras que mimetizan las escamas del pez vela. La profundidad de 0.25 mm se aproximó en base a lo observable en las fotografías del espécimen disecado que estudiaron Sagong et al [3]. Sería ideal para investigaciones futuras, poder hacer uso de sistemas de escaneo láser para poder tener medidas incluso más precisas que las empleadas en este estudio.

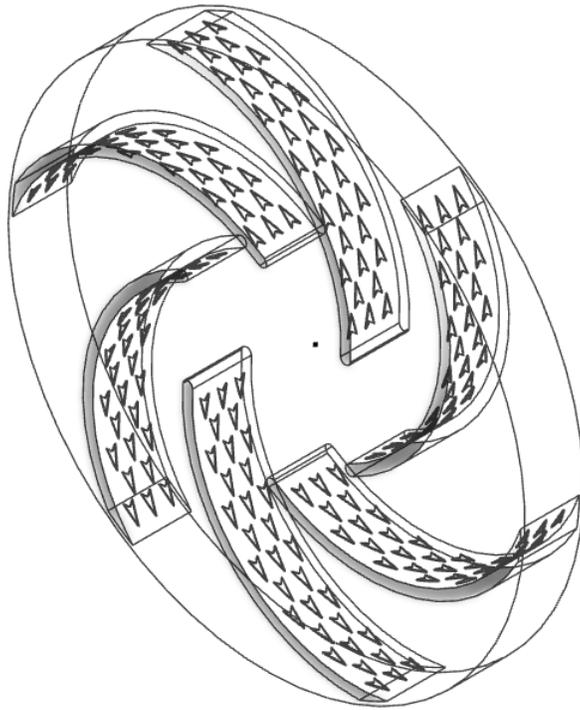


Figura 3.9: Impulsor de la bomba, “escamas” en el lado de succión

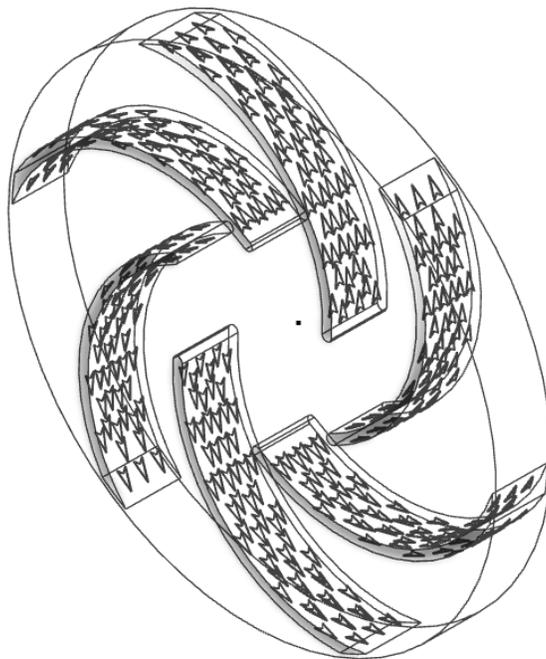


Figura 3.10: Impulsor de la bomba, “escamas” en ambos lados

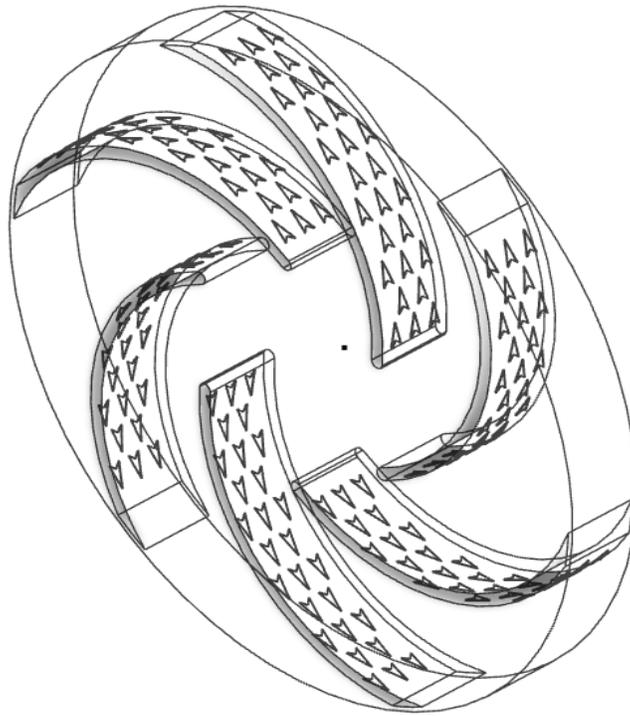


Figura 3.11: Impulsor de la bomba, “escamas” en el lado de empuje.

Las figuras 3.9 a 3.11 muestran diferentes impulsores desarrollados para la presente investigación. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la forma de las escamas, su orientación y la separación entre estas fue definida en base a lo observable en las fotos del animal tomadas por Sagong [3]. Estas figuras se ven representadas con la visualización de estructura de alambre para facilitar la identificación de las diferentes posiciones de las protuberancias. De manera similar al pez vela, las 2 puntas “inferiores” de los cuadriláteros triangulares apuntan en contra de la dirección del flujo. El patrón y cantidad elegidos fue tal y como se pudiera maximizar la cantidad de unidades de protuberancias manteniendo el patrón de distribución de estas que se observan en el pez. Ello lleva a intercalar escamas, y por sus características dimensionales, se termina con la secuencia 3-2-3-2...

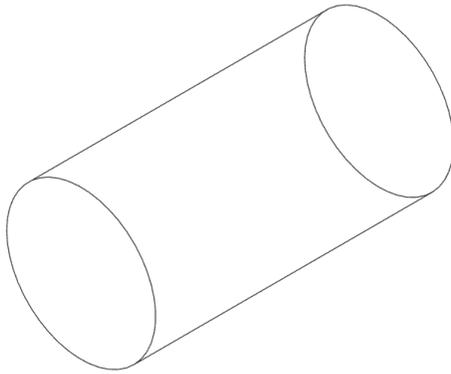


Figura 3.12: Succión de la bomba.

La figura 3.12 muestra la geometría del área de succión de la bomba, es análogo a la parte de la bomba entre la brida de succión y el impulsor en una aplicación no simulada. Tiene geometría uniforme para garantizar buen flujo de entrada al dominio del impulsor en las simulaciones ejecutadas.

### **3.1.5. Preparación del ensamble y exportación del archivo a formato .step**

A continuación, se combinan los componentes ilustrados anteriormente para formar parte de la bomba que se utilizará en ANSYS. El plano referencial de las vistas frontal y trasera se ubican en el anexo 3.

## **3.2. Simulación de CFD**

Como fue mencionado en el capítulo anterior, este inciso se dedica al desarrollo de las simulaciones en ANSYS CFX. El proceso de trabajo en ANSYS se muestra bajo el siguiente esquema:

### 3.2.1. Importación de geometría y enmallado

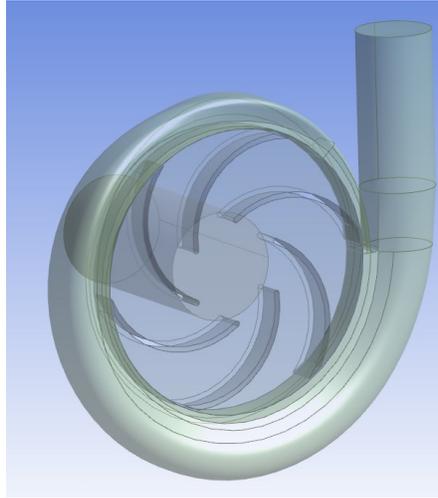


Figura 3.13.: Bomba importada a Design Modeler.

Con esto hecho, se prepara el proceso de enmallado. Para esto, se define un factor de inflación de malla que nos permita mantener un  $y^+$  de 1 mm, considerando la dimensión de las burbujas se encuentra en fracciones de este valor [13]. Para asegurar que el comportamiento de la malla sea adecuado, se realizaron varias iteraciones del enmallado ajustando los parámetros de “body sizing” para asegurar que la inflación se extendiera a lo largo de los álabes en su totalidad. El resultado de esto se muestra en la siguiente figura:

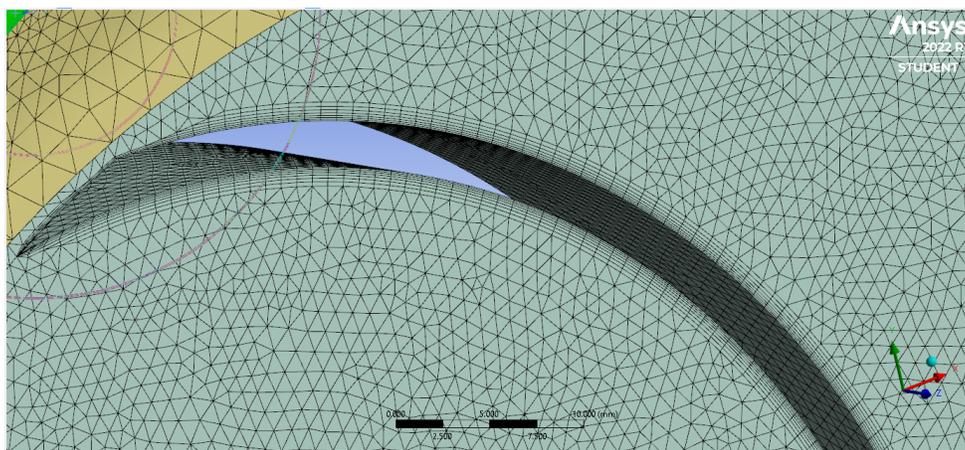


Figura 3.14: Enmallado del impulsor referencial, notar la extensión de la inflación sobre el álabes.

Para este caso, y considerando el límite de 512k nodos para la versión académica de ANSYS, se consideraron 7 capas, con ratio de crecimiento de 1.2, y grosor máximo de 1.0mm por capa.

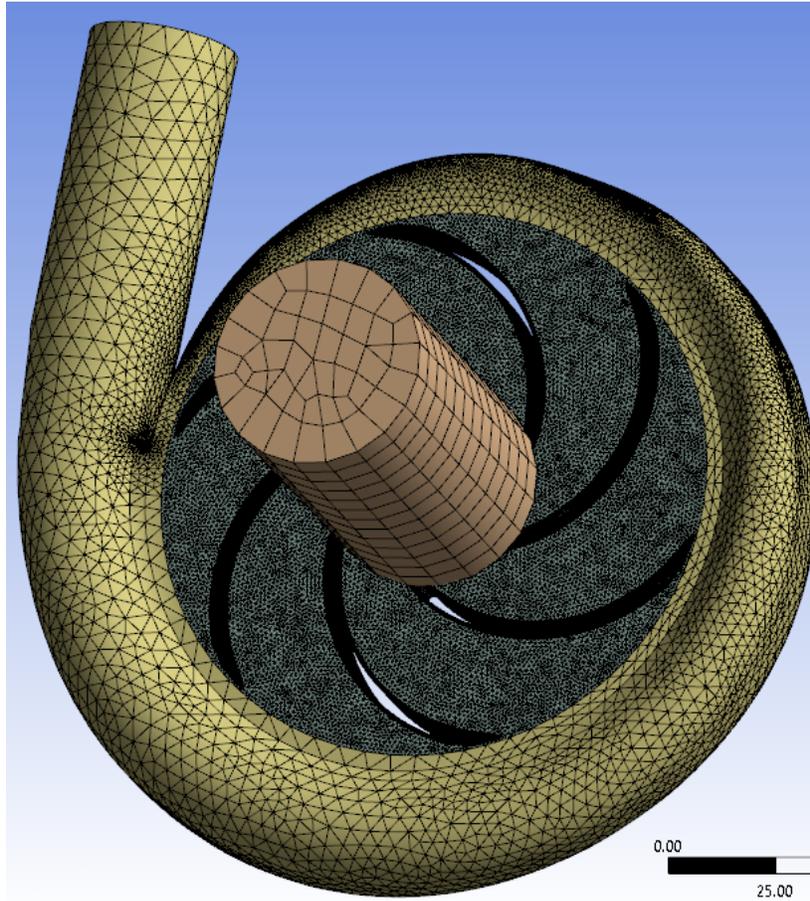


Figura 3.15: Enmallado base.

Al tener un enmallado que cumple con las características buscadas (el valor específico del  $y^+$  se explica en el modelo de turbulencia) se puede decir que la sección de enmallado se da por culminada.

### 3.2.2. Investigación y selección de modelo turbulento

Primero que nada, cabe resaltar que esta parte de la metodología es crucial, pues elegir un modelo no adecuado para el trabajo con turbomáquinas podría volver erróneos todos los

resultados observados en las simulaciones. Como se mencionó en el capítulo 2, el modelo elegido terminó siendo el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzos de Menter, más conocido como el modelo SST. Las razones de su selección fueron: buen comportamiento esperado para el caso, menor consumo de recursos que modelos más complejos y la cantidad de estudios previos dedicados a bombas centrífugas que emplearon este tipo de modelo. Se mantuvieron los valores de semilla predeterminados para el modelo, siguiendo el ejemplo de Hassan [20]

### 3.2.3. Preparación del modelo en ANSYS CFX (Pre)

Para esta sección, se replicó el método de Hassan [20] para la preparación del proceso de simulación. Primero que nada, se entra al inciso llamado “Setup” en ANSYS. Esta acción abre el configurador ANSYS CFX-Pre. Primero se generan los “Dominios” “Impeller”, “Inlet” y “Volute”. En estos se definen las condiciones de frontera, así como lo que representan las diferentes superficies dentro de nuestro modelo. Estas variables se definen dentro de diferentes fronteras o “Boundaries” que se encuentran dentro de los dominios. Las condiciones de simulación base entonces son las siguientes:

Tabla 3.2: Configuración de los dominios en CFX Pre.

Dominio	Parámetros
Impeller	Modelo SST, en rotación a -1500 RPM (eje Z hacia) con presión referencial de 0 atm, despreciando transferencia de calor.
Inlet	Modelo SST, dominio estacionario, presión referencial de 0 atm,
Voluta	Modelo SST, dominio estacionario, presión referencial de 0 atm.

Tabla 3.3: Configuración de los Sub-Dominios en CFX Pre.

Sub-Dominio	Parámetros
Álabes	Frontera de tipo Pared, en condición rotativa, sin slip, lisa.
Inlet	Presión relativa 1 atm (Presión Total estable), flujo subsónico
Outlet	Flujo subsónico, Flujo másico a 3.5 kg/s

Al tener esto, se observan fronteras “Default” junto a las fronteras que hemos creado. Estas contienen todos los segmentos de malla que no estamos brindando condiciones especiales. De este modo, cuando creamos nuestras fronteras de álabes, inlet y outlet, extraemos estas áreas del enmallado y les damos los parámetros anteriormente mencionados. El resto de la separación de secciones de la malla se da a través de la generación de interfaces, lo que se observa en lo siguiente.

Se generaron las 2 interfaces de malla requeridas (Conexiones que permiten transferencia de masa de un lugar a otro).



Figura 3.16: Interfaces CFX Pre.

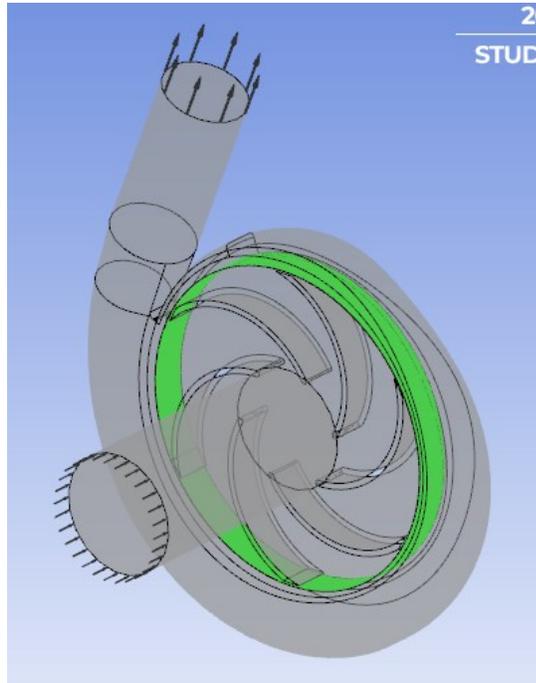


Figura 3.17: Interfaz Impeller\_Volute.

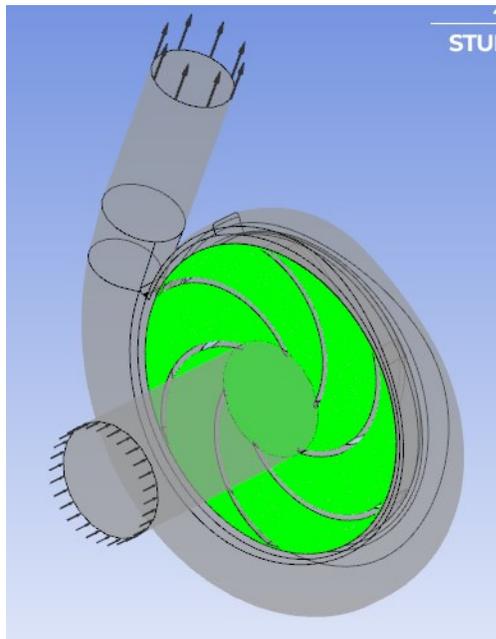


Figura 3.18: Interfaz Inlet\_Impeller.

Al tener ambas interfaces, queda entonces en el espacio “default” únicamente el contorno del inlet, la parte externa de la voluta, y la parte trasera del impulsor.

Por último, se preparan los puntos de cálculo de las variables de cabeza y eficiencia, definidos por Hassan. Para esto se crean puntos de observación dentro del control de salida. Los 2 monitores creados, Eficiencia y Cabeza se definen con los siguientes parámetros:

Tabla 3.4: Configuración de los monitores en CFX Pre.

Monitor	Configuración
Eficiencia (%)	Expresion: $((\text{massFlowAve}(\text{Total Pressure})@\text{Outlet} - \text{massFlowAve}(\text{Total Pressure})@\text{Inlet}) * ((\text{massFlow}()@\text{Inlet}) / (\text{massFlowAve}(\text{Density})@\text{Inlet}))) / (\text{torque\_z}()@\text{Blades} * (2 * \pi * 1500[\text{min}^{-1}]))$
Cabeza (NPSH, m)	Expresion: $(\text{massFlowAve}(\text{Total Pressure})@\text{Outlet} - \text{massFlowAve}(\text{Total Pressure})@\text{Inlet}) / (g * \text{massFlowAve}(\text{Density})@\text{Inlet})$

### 3.2.4. Ejecución de la simulación

Como se ha visto, en la sección CFX-Pre, se realizan las configuraciones de la simulación. Por ello, la parte de ejecución termina siendo hacer clic sobre el inciso “Solution”, configurado bajo las opciones de ejecución paralela a 4 particiones (máximo posible en la versión estudiantil de ANSYS). Cada “Run” de cálculos del modelo referencial tomó aproximadamente 30 minutos, con los modelos alternativos alrededor de los 45-50 minutos por “Run”. De cada una de estas se pueden observar las siguientes curvas:

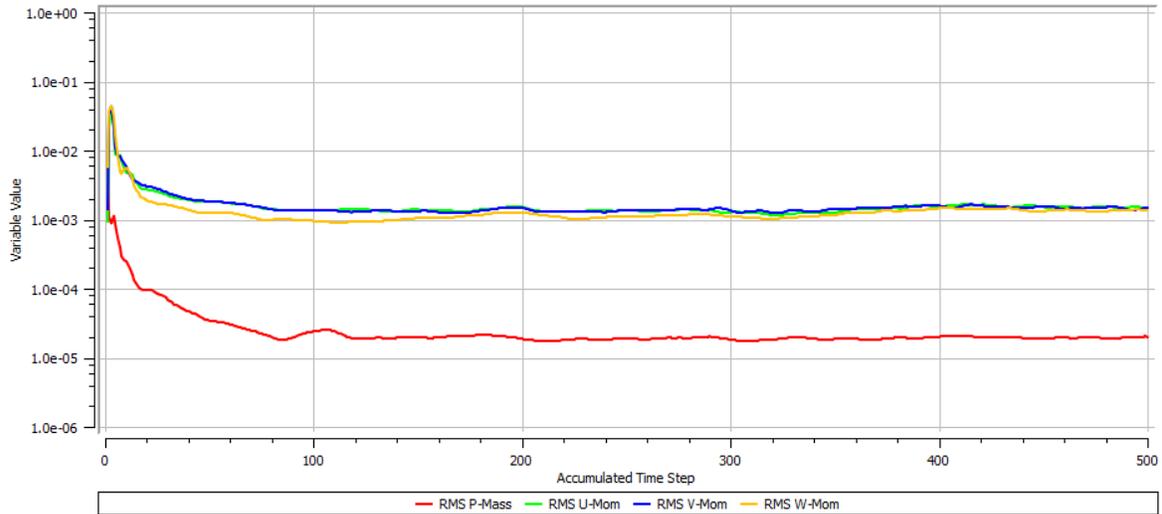


Figura 3.19: Monitor de convergencia de variables de Momento y Masa.

La figura 3.18 nos muestra la convergencia de valores por iteración de las curvas de continuidad de momento y transporte de masa siguiendo las ecuaciones de Navier-Stokes ajustadas a la consideración del modelo SST empleado para la turbulencia. Entre más bajo este valor, más preciso llega a ser el valor calculado por el software. Lo ideal es ver una tendencia al 0, sin embargo, como se puede apreciar en el gráfico, los valores luego de 500 iteraciones se mantuvieron estables. Se probaron diferentes cantidades de iteraciones y se observó que para los 4 diferentes modelos, los valores llegaban a un punto de convergencia a aproximadamente 450 iteraciones, por ende, el seteo de 500. A pesar que estos valores no llegan a lo ideal de tendencia a 0, en base al comportamiento del modelo, un valor estable es considerado aceptable para fines de simulación CFD. Todos los modelos mostraron un comportamiento similar.

Por conveniencia, los valores de cabeza y eficiencia son tabulados en la siguiente tabla.

Tabla 3.5: Resultados de variables de Cabeza y Eficiencia.

Simulación	Cabeza (NPSH, m)	Eficiencia (%)
Referencial 1.5L	7.42	46.8
Succión 1.5L	7.19	47.3

Empuje 1.5L	7.02	47.0
Doble 1.5L	6.78	50.2
Referencial 2.0L	7.00	59.0
Succión 2.0L	6.86	60.7
Empuje 2.0L	6.85	58.8
Doble 2.0L	6.92	58.2
Referencial 2.5L	6.64	73.8
Succión 2.5L	6.71	70.7
Empuje 2.5L	6.72	66.7
Doble 2.5L	6.75	66.5
Referencial 3.0L	6.69	76.4
Succión 3.0L	6.65	73.8
Empuje 3.0L	6.70	74.1
Doble 3.0L	6.72	73.0
Referencial 3.5L	6.54	79.3
Succión 3.5L	6.50	78.0
Empuje 3.5L	6.54	79.5
Doble 3.5L	6.49	79.5
Referencial 4.0L	6.61	80.1
Succión 4.0L	6.65	81.2
Empuje 4.0L	6.53	80.6
Doble 4.0L	6.52	80.6
Referencial 4.5L	6.20	75.4
Succión 4.5L	6.49	78.1
Empuje 4.5L	6.21	77.3
Doble 4.5L	6.18	76.5
Referencial 5.0L	5.27	72.9
Succión 5.0L	5.71	74.3
Empuje 5.0L	5.56	70.7
Doble 5.0L	5.44	71.1
Referencial 5.5L	4.86	72.9
Succión 5.5L	5.14	74.4
Empuje 5.5L	4.50	70.7
Doble 5.5L	4.55	71.1

La tabla 3.5 nos muestra los valores del registro de variables monitoreadas en el software CFX-Pre, en este caso, la fuente de los valores indicados en ambas columnas, para la altura de descarga, o cabeza, y la eficiencia mecánica, fueron descritas en la tabla 3.4.

Estos valores son importantes para evaluar el comportamiento de cada impulsor, pues son puntos que permiten graficar las curvas características de las diferentes bombas.

Los valores referenciales, comparados a los calculados por Hassan [20] representan un error inferior a 10%, tal y como se puede observar en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Comparación entre valores de Cabeza (NPSH, m) de Hassan y bomba referencial.

Caudal (L/s)	Hassan Bomba Ref. [20]	Bomba Referencial	Diferencia	% Diferencia
1.5	6.90	7.42	0.52	7.5%
2.0	6.90	7.00	0.10	1.4%
2.5	6.60	6.64	0.04	0.6%
3.0	6.40	6.69	0.29	4.5%
3.5	6.40	6.55	0.15	2.3%
4.0	6.30	6.61	0.31	4.9%
4.5	5.90	6.20	0.30	5.1%
5.0	5.80	5.27	0.53	9.1%
5.5	5.40	4.88	0.52	9.6%

Tabla 3.7: Comparación entre valores de Cabeza (NPSH, m) de Hassan y bomba referencial.

Eficiencia	Hassan Bomba Ref. [20]	Bomba Referencial	Diferencia	% Diferencia
1.5	48%	47%	1.3%	2.7%
2.0	58%	59%	1.0%	1.7%
2.5	68%	74%	5.8%	8.5%

3.0	74%	76%	2.4%	3.2%
3.5	79%	79%	0.2%	0.3%
4.0	84%	80%	3.9%	4.6%
4.5	84%	81%	2.7%	3.2%
5.0	82%	75%	6.6%	8.0%
5.5	79%	73%	6.1%	7.7%

Como se ha mencionado, la tabla 3.6 nos muestra la comparativa de resultados entre lo observado por Hassan en la bomba tomada de referencia, y lo simulado dentro de esta investigación. Es importante tomar en cuenta la diferencia en recursos computacionales disponibles a la investigación de Hassan. Los límites de la simulación por CFX utilizando la licencia estudiantil implica que la definición de los elementos finitos ha de ser bastante menor respecto a lo observado por Hassan. Lo importante de estas comparaciones es demostrar que los resultados de esta investigación se encuentran lo suficientemente cerca de lo obtenido con un mayor nivel de precisión como para poder realizar una comparación. No obstante, es importante aclarar que debido a los niveles de error observado por cada uno de los puntos, no se puede declarar que los resultados observados van a reflejar la realidad perfectamente, punto por punto. Es decir, se puede utilizar el comportamiento general de las tendencias entre los resultados de esta investigación, sin embargo, estas no darán un resultado con precisión suficiente como para dar valores exactos respecto a los niveles de performance de los diferentes impulsores.

Así como se tienen estos valores, existen valores de presión y velocidad, que se observan en la bomba a través de representaciones visuales en CFX. Estas se presentan a continuación:

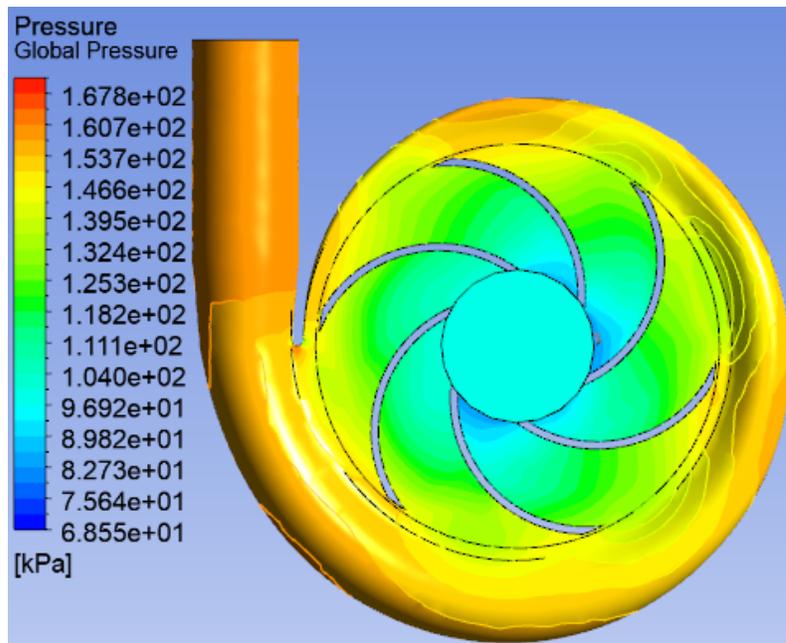


Figura 3.20: Diagrama de contornos de presión absoluta, Referencial 3.5L/s.

La figura 3.20 nos muestra la distribución de presión absoluta dentro de la voluta, para el modelo referencial (alabes lisos), a su caudal nominal. Como se puede observar en esta, la presión es mínima en la región de succión y esta va incrementando conforme el fluido se transporta a lo largo de la bomba. La región de succión muestra presiones alrededor de los 96 kPa, ligeramente por debajo de la presión atmosférica de 101.3 kPa, esto implica una ligera presión de vacío de aproximadamente 5 kPa. De manera similar, se observa una presión de descarga en el orden de 161 kPa.

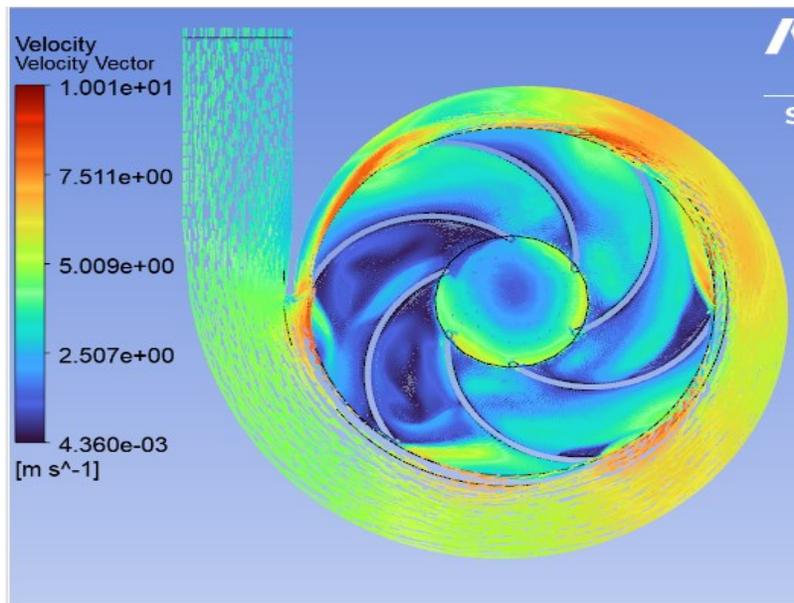


Figura 3.21: Vector Velocidad, Referencial 3.5L/s.

La figura 3.21 nos muestra la distribución de los vectores de velocidad para las diferentes partículas de agua simuladas al interior del dominio de simulación. El propósito de observar lo presente es poder observar zonas en donde el movimiento de la bomba pueda ocasionar reducciones temporales en la velocidad de un elemento de enmallado.

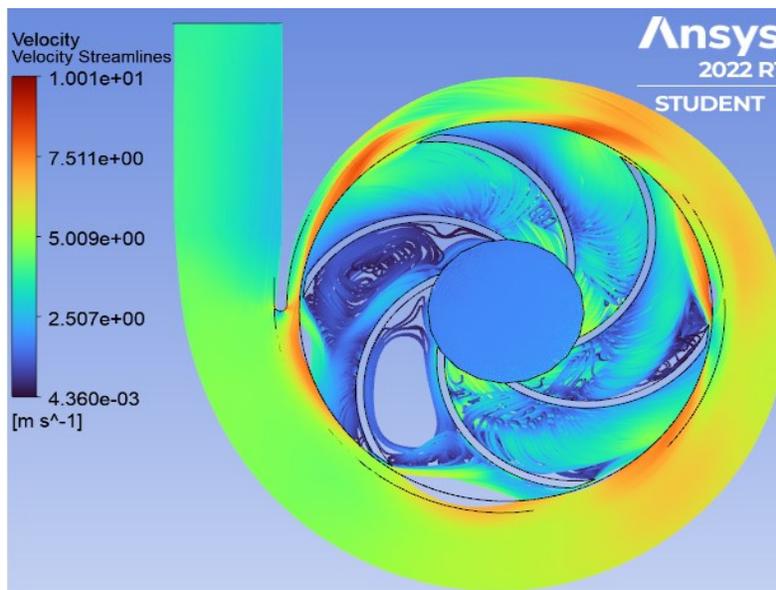


Figura 3.22: Streamlines, Referencial 3.5L/s.

La figura 3.22 nos muestra los streamlines del comportamiento del fluido al interior de la bomba. Este tipo de gráfico es de gran interés pues nos permite observar el camino que cada partícula simulada toma a través de la bomba. Esto es de gran ayuda pues permite mostrar las zonas de recirculación. Estas zonas son donde es más probable que ocurran eventos de cavitación a mayores velocidades rotacionales, o mayor demanda de caudal de descarga.

Los otros 35 casos de simulación presentan un juego de gráficos similares. Los resultados del resto se verán reflejados en los gráficos de la sección de comparación de rendimiento.

### 3.3. Comparación de rendimiento.

A continuación, se presentan las gráficas de comparación de rendimiento de los diferentes modelos de bomba.

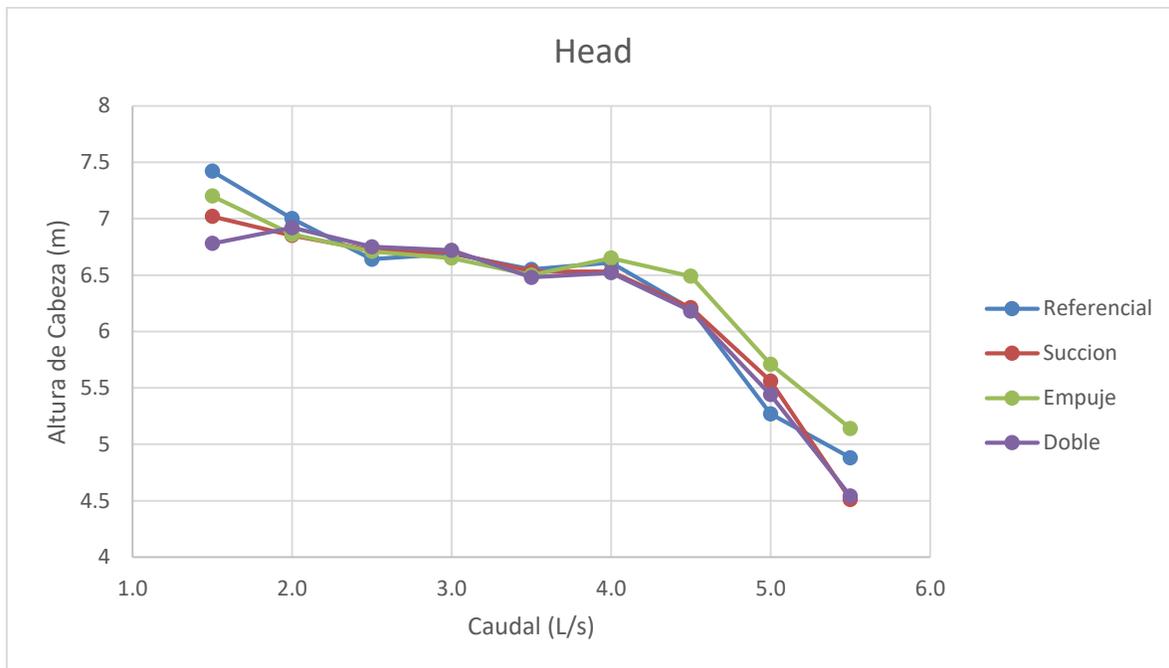


Figura 3.23: Gráfico de comparación de Cabeza.

La figura 3.23 nos muestra que en términos de NPSH o altura de descarga/cabeza, todas las bombas presentan un rendimiento similar entre 2.5 y 3.5 L/s de caudal. Se observa que la bomba referencial tiene un rendimiento superior entre 1.5 y 2.5 L/s, y que la bomba que presenta las escamas en la superficie de empuje muestra rendimiento superior entre 3.5 y 5.5 L/s. Estos resultados son de gran interés puesto que implican que a caudales bajos, llegando a los límites inferiores de operación la bomba referencial presenta un mejor rendimiento en líneas generales que todas las bombas propuestas en esta investigación. En el extremo superior, en aplicaciones de alto caudal de descarga, se observa que la bomba con escamas en el lado de empuje presenta un rendimiento prometedor. Desde el punto de vista de este parámetro, se consideran como relevantes los resultados de la bomba referencial y la bomba con escamas en la zona de empuje.

Respecto a lo observado en el diseño referencial, se observa que en líneas generales, el rendimiento a menores caudales es de entre 1% y 3% peor que el referencial según los resultados obtenidos. En lo observado por encima de los 4 L/s, se observan incrementos de entre 4.7% y 8.3%, observándose este punto máximo a los 5.0 L/s de caudal. Si se comparan los resultados con los obtenidos por Hassan, el rendimiento con un comportamiento mejorado para este impulsor sería entre los 2.5 y 4.5 L/s, con un punto máximo de 10 % en 4.5 L/s. A pesar de no poder realizar una comparación definitiva con los resultados referenciales de Hassan, debido al error presente en la simulación referencial, es interesante el observar que los valores óptimos de NPSH para el impulsor propuesto, mantiene la tendencia general de mejora observada al comparar ambos resultados en lo simulado en esta investigación. Es decir, en ambos casos, se observa que el punto de mayor rendimiento del impulsor modificado, relativo al impulsor referencial, se encuentran en caudales por encima del nominal para este (3.5 L/s).

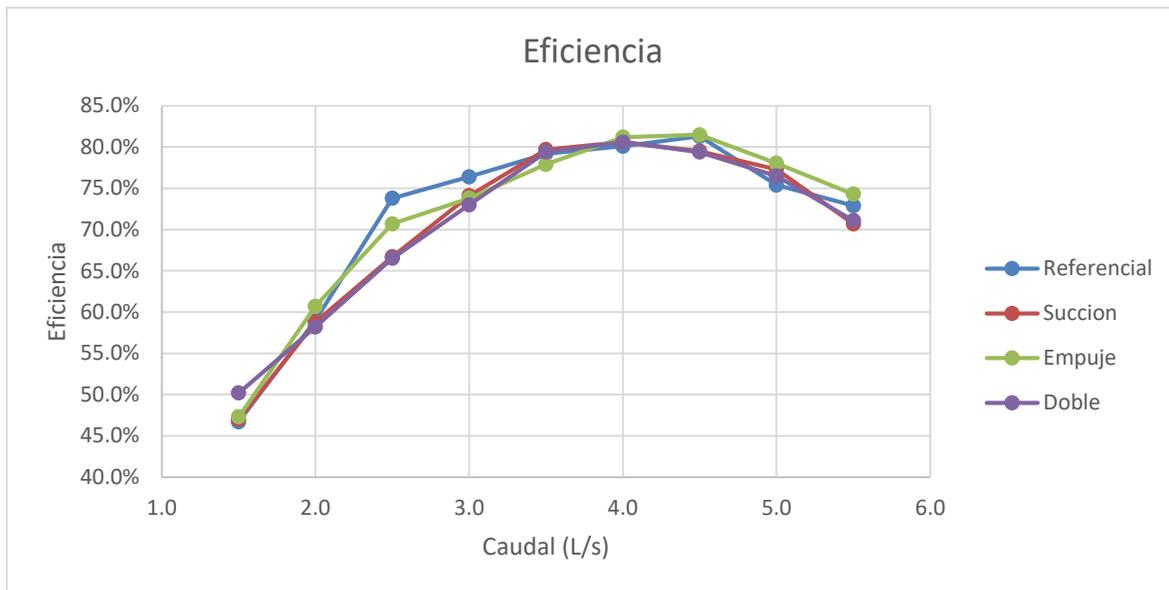


Figura 3.24: Gráfico de comparación de Eficiencia.

La figura 3.24 nos muestra las curvas de eficiencia para las 4 bombas simuladas. La bomba referencial muestra la curva mas “plana” entre todas, manteniendo un nivel de eficiencia bastante uniforme entre 2.5 y 5.5 L/s, de entre 75 y 80%. El resto de las bombas muestran comportamientos con menor eficiencia que la referencial en todos los puntos, con una excepción. Esta es nuevamente la bomba con las escamas en la superficie de empuje, en este caso esta bomba presenta un rendimiento ligeramente superior entre 4.0 y 5.5 L/s, con valores entre 75 y 80%, entre 1% y 3% por encima de los referenciales. En base a esto, se considera que los valores observados en estas dos bombas son significativos, mientras que los otros no presentan mejora alguna apreciable. Es de interés la observación que el punto de máxima eficiencia de la bomba con escamas en el punto de empuje se encuentra pegado a la región de mayor caudal relativo a la bomba referencial. Este comportamiento podría resultar ideal para equipos que operen en un rango reducido con caudales altos.

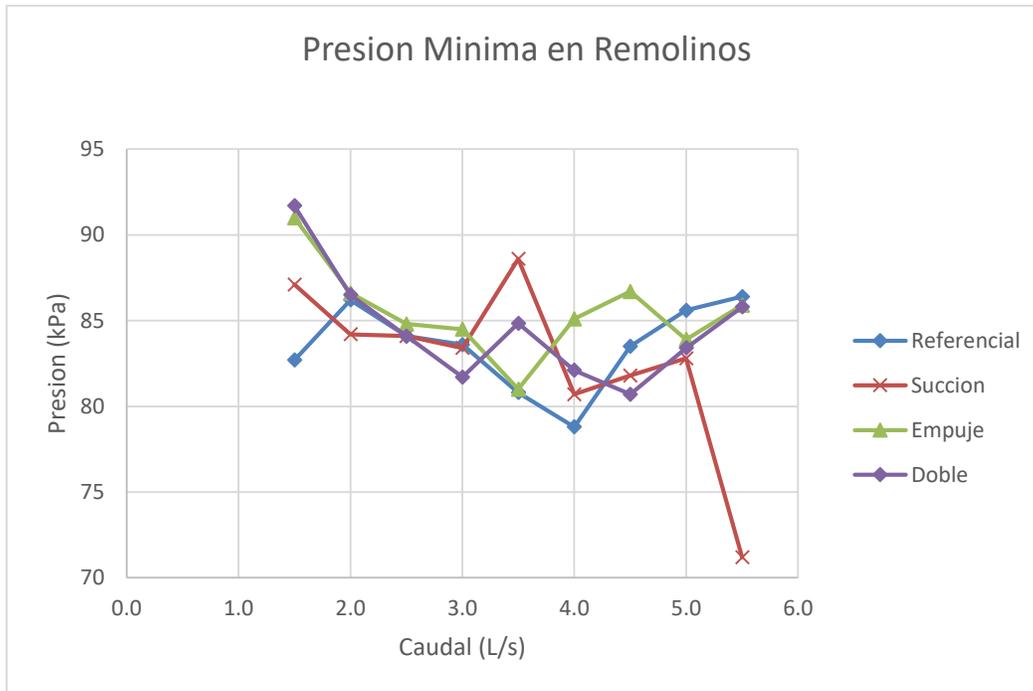


Figura 3.25: Presión mínima en remolinos.

En cuanto concierne a las presiones mínimas en las regiones de recirculación al interior de las diferentes bombas, se observa en la figura 3.25 que los resultados de presión son comparables entre todas las bombas, sin mayor observación por parte de beneficios en los otros parámetros de rendimiento o grandes fluctuaciones. A lo largo del rango de operación, la presión local mínima no baja de los 78 kPa para todas las bombas a excepción de la que presenta escamas en el lado de succión. Esta última presenta un valor mínimo en alto caudal bastante inferior, en el orden de los 72 kPa. Revisando las tablas del agua [13], se observa que la temperatura de ebullición en esta condición no baja de los 90° C. Las condiciones operativas definidas, al ser agua a condiciones estándar, implican que esta se encuentra a 25°C en todo momento. Por ello, en este caso puntual, podemos indicar que debido a la distancia entre las condiciones de operación descritas y los valores obtenidos se encuentran dentro del rango operacional habitual, por lo que no son relevantes para comparar el rendimiento entre bombas bajo el rango estudiado en esta investigación.

En cuanto concierne a lo observado en el estudio de Hassan [20], la bomba referencial, simulada en el experimento de control, muestra a 3.5 L/s una presión mínima de aproximadamente 81 kPa, este valor es prácticamente idéntico al obtenido en la simulación realizada, pues se obtuvo un valor de 80.8 kPa.

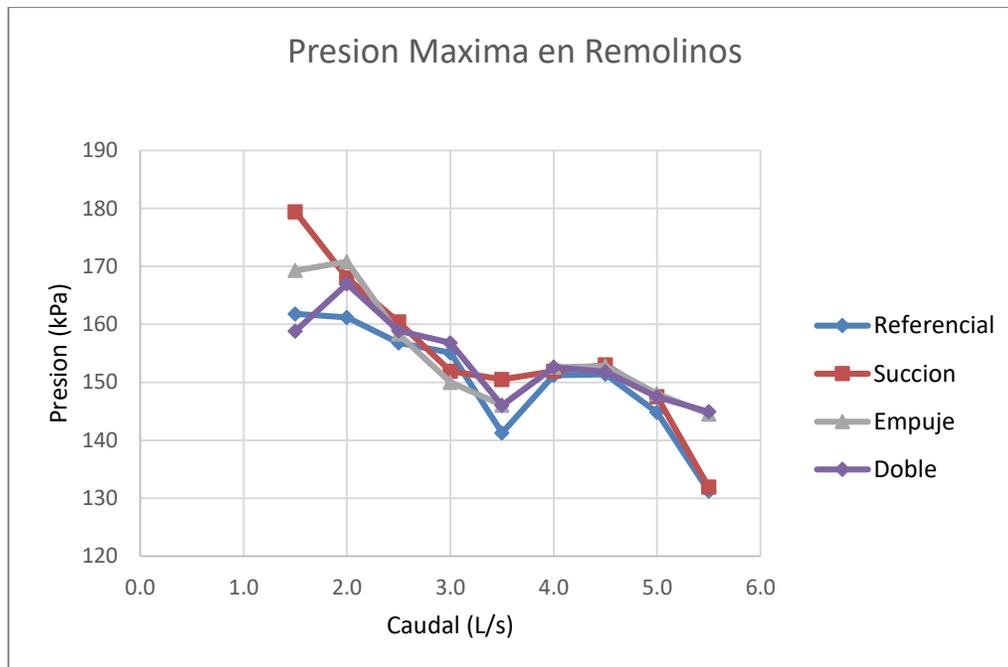


Figura 3.26: Presiones máximas en remolinos.

La figura 3.26 nos muestra las presiones máximas halladas al interior de la región de revolución del impulsor. En este caso, podemos observar que en el rango operacional entre los 2 y 5 L/s, todas las bombas presentan una presión máxima similar, con el modelo referencial mostrando una caída en los 3.5 L/s. En líneas generales, es deseable una mayor presión observada al interior de la bomba, pues puede permitir una mayor altura de descarga a un punto específico. No obstante, para poder mantener un rango operacional mas amplio, presiones uniformes, por encima de la atmosférica llegan a ser deseables. En este sentido, observamos que la bomba que muestra las peores presiones máximas en su interior, llega a

ser el modelo referencial. Esto es importante, pues se observó anteriormente que esta bomba presentaba mejores niveles de NPSH y eficiencia que la mayoría de las otras. La explicación de ello está asociada a la distribución de presiones de estas bombas. Tanto la de escamas en ambas caras y aquella en la cara de empuje mostraron sus máximas presiones cerca de la región de cambio geométrico entre el impulsor y la voluta, al lado del conducto de descarga. Esto implica que la presión obtenida llega a perderse, lo que no hace muy útil este parámetro para la evaluación de las bombas.

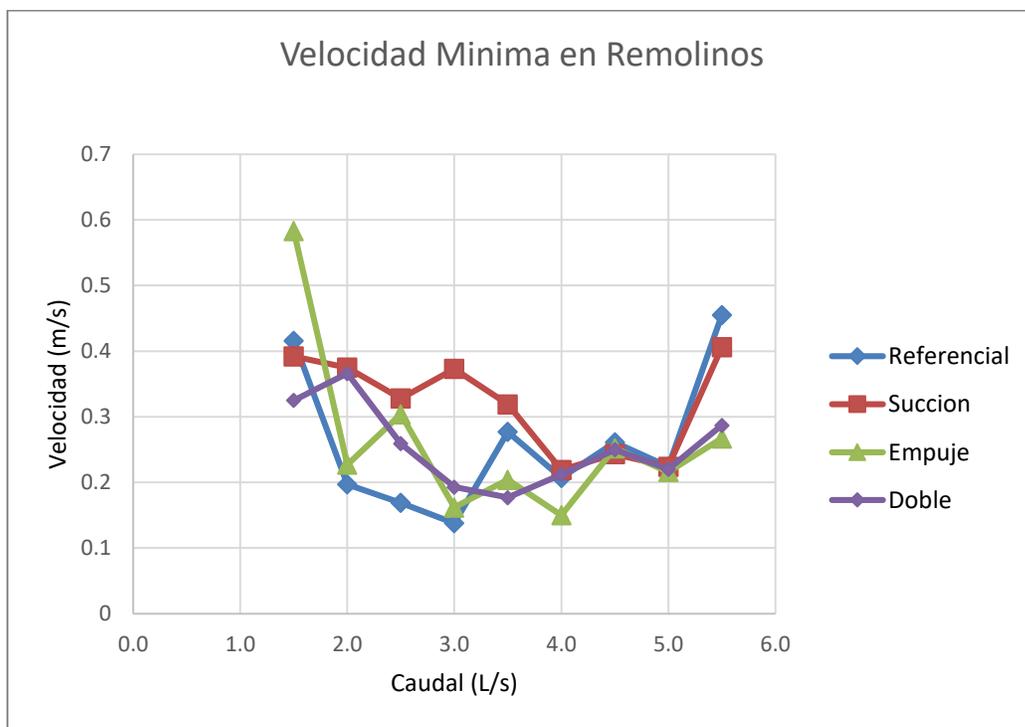


Figura 3.27: Velocidad mínima en remolinos.

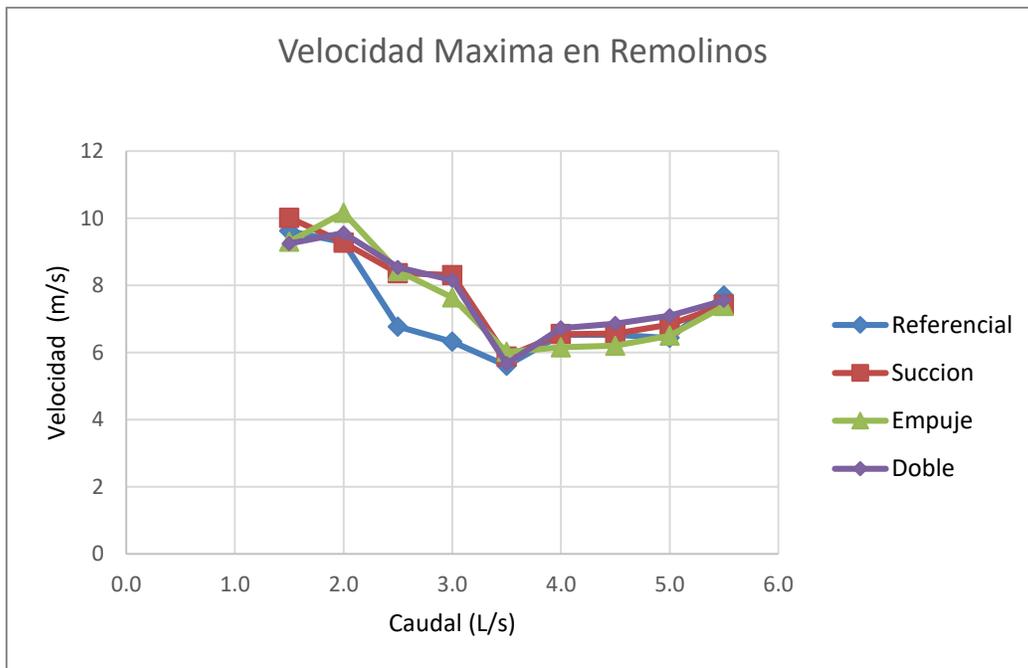


Figura 3.28: Velocidad máxima en remolinos.

El propósito de estas últimas dos figuras es el poder realizar una comparación de las velocidades al interior de la región del impulsor de bomba. Tanto la 3.27 y 3.28 representan las velocidades al interior de la región donde se ubica el impulsor. Se puede observar que, en términos de la velocidad máxima, figura 3.28, los comportamientos de todas las bombas son similares, con la excepción del impulsor referencial. Esto se observa en los puntos de 2.5 y 3.5 L/s de caudal. Esto encaja con los valores anteriormente mencionados en referencia a la eficiencia, es decir, en base a los resultados obtenidos anteriormente, podemos inferir que entre menor la velocidad a un punto específico, se debería de tener un mejor valor de eficiencia en el gráfico inicial. Esto es debido a que la velocidad es inversamente proporcional a la presión según la identidad de Bernoulli, considerando que el fluido de trabajo es incompresible. [13]

Al momento de comparar esto con la figura 3.27, se tiene una apreciación completamente diferente. La distribución de las velocidades mínimas no parece estar reflejando el comportamiento de otros parámetros de evaluación, al no mostrarse una tendencia clara entre los diferentes casos de estudio. Este parámetro, similarmente al de las presiones mínimas, no nos llega a decir demasiado al rendimiento del impulsor debido a que no se observa una correlación directa entre este y los otros parámetros medidos.

En base a lo mencionado anteriormente, se puede indicar lo siguiente: de los 4 impulsores simulados, 3 de ellos se diseñaron en base a las fotografías tomadas por Sagong et al [3] en su investigación de las características del pez vela. De estas 3, se observa que únicamente la que presenta la modificación en los álabes en la zona de empuje muestra un rendimiento aparentemente superior. Se indica esto por mostrar valores mas altos en tanto NPSH como Eficiencia. Se validó con los valores de presión y velocidad que en ningún momento el agua al interior de la bomba se encuentra por encima del punto de vaporización, lo que implica que no experimenta cavitación en el rango evaluado. En este sentido el impulsor propuesto supondría una mejora de rendimiento en el rango superior de caudal lo que tiene el potencial de ser una mejora en aplicaciones donde el espacio es una limitante importante. Es recomendable entonces que se realicen investigaciones futuras en torno a este tipo de adaptaciones a fin de validar los resultados de simulación con experimentos de laboratorio.

Tomando todo lo mencionado en cuenta, es necesario determinar las posibles fuentes de error en esta investigación. Para ello lo siguiente: el modelo de la adaptación se realizó en base a fotografías magnificadas tomadas por Sagong et al [3]. Sería idóneo repetir el experimento utilizando tomas en 3D mediante herramientas de escaneo in vivo de un ejemplar para mejorar el detalle de lo realizado.

La falta de resolución asociada al enmallado de ANSYS al momento de preparar los ensayos tienen el potencial de reducir la precisión de los resultados obtenidos. Esto se debe a que el incremento de complejidad en la geometría entre el diseño referencial y los 3 propuestos suponen incremento de detalle de cantidad de nodos en las regiones cercanas a estos. Así mismo, las diferencias entre el desarrollo de uniones de sólidos entre SolidWorks y Autodesk Inventor pueden haber ocasionado imperfecciones en el sólido combinado de formato .step. Esto puede introducir regiones que no siguen la geometría determinada en el diseño al momento de realizar la simulación, creando una posible imprecisión en los resultados. Finalmente, por parte de la simulación, la simulación de Hassan [20] determinó que la cantidad de elementos óptima para fines de la bomba referencial era de 600k, esto se encuentra aproximadamente en el orden del 100% por encima de lo que se pudo ejecutar en esta investigación debido a las limitaciones de licenciado. Si se desea realizar una simulación en estado transiente, para evaluar cavitación en tiempo real, es necesario el uso de millones de elementos lo cual se encontró fuera del alcance de esta investigación.

El error respecto a lo calculado en las simulaciones de Hassan [20], como fue comentado anteriormente, fue de un 8.5% o menos respecto a los valores de su bomba referencial. Es altamente probable que estos errores estén asociados a problemas de convergencia de simulación que se observaron en los residuales de cálculo para las ecuaciones de conservación de momento. Estos a su vez son atribuibles a la pérdida de resolución de simulación asociada con la licencia estudiantil de ANSYS. Finalmente esto lleva nuevamente a la idea que es recomendable realizar investigaciones futuras para validar los resultados observados mediante uso de experimentos de laboratorio.

## CONCLUSIONES

Según lo investigado en este proyecto sobre cavitación, bombas centrífugas y CFD se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Se realizó el análisis comparativo de las características hidrodinámicas del pez vela, el animal seleccionado para el estudio, determinando que se emplearía la geometría superficial de la piel de este como base de diseño para la modificación de los álabes. Se utilizaron las dimensiones capturadas en fotografías de investigaciones de esta especie, teniendo protuberancias en forma de cuadrilátero triangular, con dimensiones de 5 mm de altura, 2.25 mm de ancho, y 0.25 mm de profundidad. La altura de base al ángulo obtuso entre las 2 puntas inferiores del cuadrilátero fue de 1.125 mm
2. Se realizó el modelado y simulación de una bomba centrífuga con impulsor referencial, en donde se intercambié por 3 otros diseños propuestos en base a las escamas del pez vela. Estos 4 impulsores se simularon mediante ANSYS CFX con una resolución dentro de los límites de 512k nodos y elementos, utilizando el modelo de turbulencia SST a las condiciones que se probó la bomba referencial en el estudio de referencia. Esto resultó en un total de 36 simulaciones.
3. Se validaron los resultados obtenidos utilizando el experimento de control como base de comparativa, observándose un error en los resultados menor o igual al 8.5%. Este valor se obtuvo comparando el experimento de control con los resultados del estudio referencial.
4. Se evaluó el rendimiento de los 3 impulsores propuestos respecto al referencial y se observa que el impulsor con álabes con las protuberancias de la superficie del pez vela, aplicado al lado de empuje, presenta un rendimiento superior, en términos de

NPSH y eficiencia, en el límite superior del rango operativo del modelo referencial. El caudal óptimo para este impulsor, maximizando por eficiencia, es de 4.5 L/s, 1.0 L/s por encima del nominal de la bomba referencial. Asimismo, este impulsor presenta eficiencias de 0.2% y 3.5% superior al referencial entre los caudales de 4.5 L/s y 5.5 L/s.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Fratzl, "Biomimetic Materials Research: What Can We Really Learn From Nature's Structural Materials?" in *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 4, no. 15, 2007, pp. 637-642.
- [2] M. Miyazaki, Y. Hirai, H. Moriya, M. Shimomura, A. Miyauchi and H. Liu, "Biomimetic Design Inspired Sharkskin Denticles and Modeling of Diffuser for Fluid Control", in *Journal of Photopolymer Science and Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 133-138, 2018. Disponible en: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/photopolymer/31/1/31\\_133/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/photopolymer/31/1/31_133/_pdf)
- [3] W. Sagong, W. Jeon, H. Choi, "Hydrodynamic Characteristics of the Sailfish (*Istiophorus platypterus*) and Swordfish (*Xiphias gladius*) in Gliding Postures at Their Cruise Speeds", in *PLoS One.*, vol. 8(12), C.M. Aegerter, Ed., 2013. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081323>
- [4] J. E. Clark, J. G. Cham, and S. A. Bailey, "Biomimetic Design and Fabrication of a Hexapedal Running Robot", *2001 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea. May. 2001, pp. 3643-3649 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933183>
- [5] H. Wang, H. Xu, Y. Zhang, S. Chen, Z. Zhao and J. Chen, "Design of a Bio-Inspired Anti-Erosion Structure for a Water Hydraulic Valve Core: An Experimental Study", in *Biomimetics*, vol. 4, no. 3, p. 63, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/biomimetics4030063> [Accessed 28 October 2021].
- [6] J. Wang, T. Nakata and H. Liu, "Development of Mixed Flow Fans with Bio-Inspired Grooves", in *Biomimetics*, vol. 4, no. 4, p. 72, 2019. Disponible en:

<https://doi.org/10.3390/biomimetics4040072> [Accessed 28 October 2021].

- [7] X. Liu, X. Wang, H. Tang and G. Xi, "Performance Improvement of Multi-Blade Centrifugal Fan by Using Optimal Bionic Blade", in *Volume 8: Turbomachinery, Parts A, B, and C*, 2012. Disponible en: <https://doi.org/10.1115/gt2012-70061> [Accessed 28 October 2021].
- [8] X. Gong et al., "Nature-Inspired Modified Bat Algorithm for the High-Efficiency Optimization of a Multistage Centrifugal Pump for a Reverse Osmosis Desalination System", in *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 7, p. 771, 2021. Available: <https://doi.org/10.3390/jmse9070771> [Accessed 28 October 2021].
- [9] Y. Çengel and J. Cimbala, *Fluid mechanics Fundamentals and Applications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2014, pp. 797,904-906.
- [10] S.R. Shah, S.V. Jain, R.N. Patel, V.J. Lakhera, "CFD for centrifugal pumps: a review of the state-of-the-art", *Procedia Engineering* 51, pp. 715-720, 2013
- [11] B.Lai et al. "Liquids with high compressibility", *advanced materials*, 35, 2023  
Available at: <https://doi.org/10.1002/adma.202306521>
- [12] N. Qiu, M. Li, J. Wu, H. Zhu, P. Xu, "Numerical Investigation of Vortex Generator on Controlling Flow Field of Centrifugal Pump Based on Response Surface Method", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol 17 No. 8, pp1774-1791, 2024.  
Available at: <https://doi.org/10.47176/jafm.17.8.2293>

- [13] R.C. Hibbeler, *Fluid Mechanics*, Hoboken, N.J.: Pearson, 2018.
- [14] E. Niazi, M. Mahjoob, A.B. Tabrizi, “Experimental and Numerical Study of Cavitation in Centrifugal Pumps”, *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis Volume 3*, 2010.
- Available: <http://dx.doi.org/10.1115/ESDA2010-24332>
- [15] J. Kühlmann, S.A. Kaiser, “Single-Bubble Cavitation-Induced Pitting on Technical Alloys”. *Tribology Letters*, 2024.
- [16] J. Bannantine, J. Comer and J. Handrock, *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1990.
- [17] K. Narayan, K. Rao and M. Sarcar, *Computer aided design and manufacturing*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2008.
- [18] N. Hall, “Navier-Stokes Equations, 3-dimensional-unsteady”, Glenn Research Center, NASA, 2021.
- [19] C. Rumsey, “Turbulence Modeling Resource The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model”, Langley Research Center, NASA, 2013
- [20] A. Hassan, “Experimental and Computational Study of Semi-open Centrifugal Pump”, Stuttgart, 2015.
- Available: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.5190.3766>
- [21] M. Kim, H. Jin, W. Chung, “A Study on Prediction of Cavitation for Centrifugal Pump”, in *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science*

*Index 72, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 6, no.12, pp.2720-2725, 2012.

Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1073012>

- [22] R. Hernández, *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill, 2014
- [23] Autodesk, “Inventor: Powerful mechanical design software for your most ambitious ideas”. <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [24] Ansys, “ANSYS CFX Turbomachinery CFD Software”. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
- [25] D. K. Wainwright, F. E. Fish, S. Ingersoll, T. M. Williams, J. St Leger, A. J. Smits, and G. V. Lauder, “How smooth is a Dolphin? the ridged skin of odontocetes,” *Biology Letters*, vol. 15, no. 7, 2019.
- [26] F.E. Fish, “Biomimetics and the Application of the Leading-Edge Tubercles of the Humpback Whale Flipper.” Springer, 2020.
- [27] Y. Zhang, S. Zheng, Y. Zhao, “Numerical investigation of flow characteristics in the front and rear chambers of centrifugal pump and pump as turbine”. *Nature: scientific reports*, 2024
- [28] W. Zhang et al., "Catechol-functionalized hydrogels: biomimetic design, adhesion mechanism, and biomedical applications", in *Chemical Society Reviews*, vol. 49, no. 2, pp. 433- 464, 2020. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/getauthorversionpdf/c9cs00285e> [Accessed 30

September 2021].

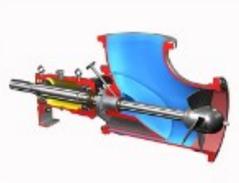
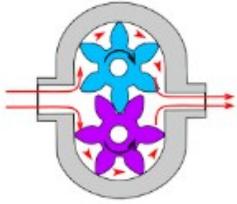
- [29] H. Wang et al., "Biomimetic Design of Hollow Flower-Like g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@PDA Organic Framework Nanospheres for Realizing an Efficient Photoreactivity", *Small*, vol. 15, no. 16, p. 1900011, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/sml.201900011> [Accessed 30 September 2021].
- [30] B. Zhang et al., "The biomimetic design and 3D printing of customized mechanical properties porous Ti6Al4V scaffold for load-bearing bone reconstruction", in *Materials & Design*, vol. 152, pp. 30-39, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518303496>
- [31] K. Jang et al., "Soft network composite materials with deterministic and bio-inspired designs", in *Nature Communications*, vol. 6, no. 1, 2015. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/ncomms7566.pdf>
- [32] A. Scarangella, V. Soldan and M. Mitov, "Biomimetic design of iridescent insect cuticles with tailored, self-organized cholesteric patterns", in *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, 2020. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17884-0.pdf?origin=ppub>. [Accessed 30 September 2021].
- [33] J. Álvarez, "Comunidades locales, conservación de la avifauna y de la biodiversidad en la Amazonía peruana", in *Revista Peruana de Biología*, vol. 14, no. 1, 2007. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-99332007000200026](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332007000200026).

# ANEXOS

## ANEXO 1: Cronograma

Actividad\Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Investigación de especies de vida Marina	■	■	■	■												
Filtrado de especies	■	■	■	■												
Elaboración de matriz morfológica	■	■	■	■												
Desarrollo de un concepto inicial de mejora para los álabes			■	■	■											
Desarrollo de un modelo 3D para simulación				■	■	■										
Optimización del modelo para CFD					■	■										
Enmallado del Modelo					■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Implementación de Simulación						■	■	■	■	■	■	■	■			
Selección de Variables relevantes							■	■								
Optimización de condiciones de frontera						■	■	■	■	■						
Comparación de rendimiento											■	■	■	■	■	■
Desarrollo de Conclusiones											■	■	■	■	■	■

## ANEXO 2: Matriz Morfológica

Características	1	2	3
Tipo de Bomba	 <p>Bomba de flujo Axial</p>	 <p>Bomba Centrífuga</p>	 <p>Bomba de Desplazamiento Positivo</p>
Localización de la adaptación	 <p>Aletas</p>	 <p>piel</p>	 <p>Cola</p>
Animal	 <p>Pez Vela del Atlántico</p>	 <p>Ballena Azul</p>	 <p>Delfín nariz de botella común</p>

### ANEXO 3: Vistas de Bomba Referencial.

