



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO A
TRAVÉS DEL DOMINIO FLUIDIZADO
ROTOR-ÁLABES GUÍAS DE UNA BOMBA
DE FLUJO AXIAL.**

Autores: Piña, Leonardo

C.I. 22.519.869

Rufa, Stefano

C.I. 24.495.930

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo

Urb. Yuma II, calle N^a 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394

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

**SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO A TRAVÉS DEL DOMINIO
FLUIDIZADO ROTOR-ÁLABES GUÍAS DE UNA BOMBA DE FLUJO
AXIAL.**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO.

Autores: Piña, Leonardo
C.I. 22.519.869
Rufa, Stefano
C.I. 24.495.930

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo

San Diego, Junio 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-TG-064-2017-2

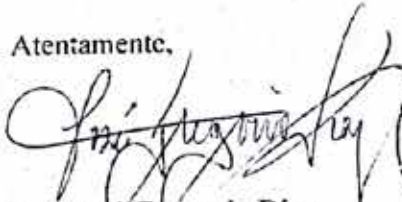
Valencia, 07 de Julio de 2017.

Ciudadanos:
Piña Leonardo
C.I. 22.519.869
Rufa Stefano
C.I. 24.495.930
Presente.-

Cumpro con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 2-2017 de fecha 07/07/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO A TRAVÉS DEL DOMINIO FLUIDIZADO ROTOR-ÁLABES GUÍAS DE UNA BOMBA DE FLUJO AXIAL" presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo, C.I. 12.014.408 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutotes Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,


Ing. José Gregorio Díaz
Decano de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (2).

JGD/ fr




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

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ing. Gruber A. Caraballo, portador de la cédula de identidad N° 12.014.408, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Leonardo Piña, portador de la cédula de identidad N° 22.519.869, y Stefano Rufa, portador de la cédula de identidad N° 24.495.930, titulado **“SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO A TRAVÉS DEL DOMINIO FLUIDIZADO ROTOR-ÁLABES GUÍAS DE UNA BOMBA DE FLUJO AXIAL.”**, presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 16 días del mes de Octubre del año 2017.


12.014.408
Ing. Gruber A. Caraballo
12.014.408
Tutor Académico.

DEDICATORIA

Primeramente quiero dedicar este trabajo de grado a mis padres, Roberto Rufa y Beatriz Seijo, quienes se encargaron de hacer de mí un hombre con principios y valores correctos, y por siempre brindarme un apoyo incondicional.

A mi novia, Daniela Ramírez, pilar fundamental en mi vida, la cual tiene muchos méritos en la realización de este sueño que hoy estoy cerca de cumplir, el ser egresado de Ingeniería Mecánica y un profesional.

A mis hermanos, Elektra Rufa y David Álvarez, que de una forma u otra siempre me hicieron sentir capaz de alcázar esta meta y de que no desistiera en este largo camino, lleno de altos y bajos, pero con un gran objetivo.

A todo el profesorado que a lo largo de la carrera aportaron de su conocimiento para mi formación académica, pero en especial a nuestro tutor y profesor, el Ing. Gruber Caraballo, quien nos brindó el apoyo necesario y de todo su amplio conocimiento, para la elaboración adecuada de esta investigación de grado.

Y por último, a todos mis compañeros de clase, hermanos de lucha y perseverancia.

Stefano Rufa Seijo.

RECONOCIMIENTO

Antes que a nada hago un agradecimiento a dios, por haberme brindado la oportunidad de hoy estar aquí, cumpliendo un sueño, y dándome la fuerza de voluntad para sortear todos los obstáculos presentados.

Agradezco al Prof. Gruber Caraballo por estar dispuesto a tutorar nuestro trabajo de grado, colaborando en los aspectos necesarios, con su experiencia y sabiduría, para así poder hacer de esta propuesta un proyecto factible.

A la UJAP, nuestra casa de estudio durante todo este tiempo, que nos brindó los medios materiales para nuestra formación como profesionales.

A la Prof. Alicia Pizzella y su esposo, el Prof. Giovanni Pizzella, de los cuales obtuve un gran aprendizaje para mi formación y siempre estuvieron dispuestos a brindar su ayuda.

Y por último, a mis amigos, Leonardo Piña, compañero de tesis, y Emmanuel Sánchez, compañero de estudio a lo largo de toda la carrera.

Stefano Rufa Seijo.

RECONOCIMIENTO

Primeramente agradecerle a Dios por darme la vida y por ayudarme cada día a cumplir mis metas y sobre todo enseñarme que a pesar de las dificultades y obstáculos que te ponga vida si te propones algo puedes lograrlo.

A mi madre Mireya una mujer fuerte que con sus consejos todos los días y sus valores me ha enseñado a ser cada día una mejor persona y me siento muy orgulloso de ser su hijo, de igual forma agradecerle a mi padre Wilmen un hombre trabajador que cada día me ha enseñado seguir siempre el buen camino y darlo todo por apoyarme en mi carrera. Los quiero mucho padres.

A mi hermano Eduardo que siempre ha estado conmigo en todos los momentos de la vida, dándome su apoyo para cada ocasión de la vida.

A mi amor Mariangel mi preciosa gracias por apoyarme en todo y estar conmigo en los buenos y malos momento de la vida. Te conocí comenzando el primer semestre de ingeniería mecánica y ahora ya culminando mi carrera me sigues apoyando en todo te amo.

Agradecerle a mi tío Richard que seguramente estuviera aquí celebrando mi triunfo, pero que lamentable no se encuentra conmigo. Que Dios lo tenga en la gloria te quiero mucho tío sé que te sientes orgulloso.

A mi tutor Gruber Caraballo la cual nos brindó su apoyo en todo momento de nuestra carrera gracias por su dedicación y su orientación fue de gran importancia para la elaboración de nuestro trabajo de grado.

Leonardo José Piña Chacón.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
LISTADO DE TABLAS.	ix
LISTADO DE GRÁFICAS	x
LISTADO DE FIGURAS	x
RESUMEN INFORMATIVO	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1	Planteamiento del Problema	3
1.2	Formulación del Problema.....	5
1.3	Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1	Objetivo General.....	5
1.3.2	Objetivos Específicos.....	5
1.4	Justificación de la Investigación	5
1.5	Limitaciones.....	6
1.6	Alcance	7

II MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes de la Investigación.....	8
2.2	Bases Teóricas	10
2.2.1	Fluido.....	10
2.2.2	Propiedades de los fluidos.....	11
2.2.3	Flujo.....	12
2.2.4	Tipos de Flujo.....	12
2.2.5	Máquinas generadoras o bombas.....	15
2.2.6	Clasificación de las bombas rotodinámicas.....	17
2.2.7	Elementos constitutivos de una bomba.....	18
2.2.8	Bombas axiales.....	18

2.2.9 NPSH.....	24
2.2.10 Leyes de semejanza para las bombas.....	26
2.2.11 Ecuación de continuidad.....	27
2.2.12 Ecuación de la energía.....	29
2.2.13 Ecuación de la cantidad de movimiento.....	30
2.2.14 Dinámica de fluidos computacional CFD.....	30
2.2.15 Fundamentos de CFD.....	31
2.2.16 Simulación en CFD.....	32
2.3 Definición de terminos básicos.....	37
III MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Propósito de la investigación.....	40
3.2 Tipo de la investigación.....	41
3.3 Nivel de la investigación.....	41
3.4 Población y muestra.....	42
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	42
3.6 Fases metodológicas.....	43
IV RESULTADOS	
4.1 Análisis de resultados.....	72
4.1.1 Organización y clasificación de los reultados obtenidos en la simulación en forma de gráficas y/o tablas de variables descriptivas del fenómeno.....	72
4.1.2 Valoración de los resultados de la simulación.....	84
4.2 Conclusiones y recomendaciones.....	86
4.2.1 Conclusiones.....	86
4.2.2 Recomendaciones.....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	90

LISTADO DE TABLAS.

1. Condiciones de operaciones del rotor.....	44
2. Condicones de operación del estator.....	44
3. Variación de presiones absolutas entre la entrada y la salida del rotor.....	77
4. Variación de velocidad absolutas entre la entrada y la salida del rotor.....	77
5. Variación de presiones absolutas entre la entrada y la salida del estator.....	84

6. Variación de velocidad absoluta entre la entrada y la salida del rotor.....	84
7. Alturas para los distintos valores de caudal, rotor girando a 850 rpm.....	85
8. Valores de caudal y altura para la bomba KSB Amacan 350 A4.	85

LISTA DE GRÁFICOS

1. Convergencia de la simulación en el rotor, las ecuaciones de gobierno llegan al valor de 1×10^{-5}	68
2. Convergencia de la simulación en el estator, las ecuaciones de gobierno llegan al valor de 1×10^{-4}	69
3. Convergencia de la simulación en el estator, las ecuaciones de gobierno llegan al valor de 1×10^{-4}	69
4. Gráfica de variación de presión del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.....	73
5. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.....	73
6. Gráfica de la variación de presión del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.....	75
7. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.....	75
8. Gráfica de variación de presión del flujo a través del estator con rotor girando a 850 rpm.....	78
9. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través estator con rotor girando a 850 rpm.....	78
10. Gráfica de variación de presión del flujo a través del estator con rotor girando a 1750 rpm.....	81
11. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través estator con rotor girando a 1750 rpm.....	81
12. Curvas H vs Q de la bomba comercial y el rotor simulado en la investigación.....	86

LISTADO DE FIGURAS

1. Esquema de una bomba centrífuga.....	16
2. Esquema de una bomba axial vertical de una etapa.....	17
3. Vista isométrica de un impulsor axial de la bomba.....	20
4. Vista isométrica de un impulsor axial de la bomba con álabes guías.....	20
5. Comparación de las características entre las bombas centrífugas y axial.....	21

6.	Diagrama de velocidades en la entrada y salida del rotor.....	22
7.	Curvas características de una bomba axial.....	23
8.	Relación entre curvas de NPSH.....	26
9.	Flujo a régimen permanente a través de un tubo de corriente.....	28
10.	Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices.....	34
11.	Plano del rotor de la bomba axial. Vista frontal y vista lateral.....	44
12.	Plano del estator de la bomba axial. Vista frontal y vista lateral.....	45
13.	Diseño realizado por inventor del rotor de la bomba axial.....	46
14.	Diseño realizado por inventor del estator de la bomba axial.....	46
15.	Dominio fluidizado del rotor. (A) Vista lateral derecha, Vista lateral izquierda. (B) Vista interna del dominio fluidizado.....	47
16.	Detalle del dominio fluidizado den la zona de los alabes del rotor.....	48
17.	Mallado del dominio fluidizado en el rotor.....	49
18.	Detalles del mallado del dominio fluidizado en el rotor. (a) Vista semi superior del mallado. (b) Acercamiento a la zona interna del mallado.....	49
19.	Detalles del mallado tetraédrico del dominio fluidizado en el rotor.....	49
20.	Dominio fluidizado del estator.....	50
21.	Detalle del dominio fluidizado en la zona de los alabes del estator.....	50
22.	Mallado del dominio fluidizado en el estator.....	51
23.	Detalle del mallado del dominio fluidizado en el estator.....	51
24.	Detalles del mallado tetraédricos del dominio fluidizado en el estator.....	52
25.	Dominio fluidizado y generado de mallado del conjunto rotor-estator.....	52
26.	Dominio fluidizado y generado de mallado del conjunto rotor-estator Vista lateral derecha. Vista lateral izquierda.....	53
27.	Generación del dominio fluidizado y generado de mallado través de la operación denominada boolean.....	53
28.	Detalles del mallado tetraédricos del dominio fluidizado del conjunto rotor-estator.....	54
29.	Interfaz del ANSYS. Introducción del mallado en CFX Pre.....	54
30.	Configuraciones básicas del dominio fluidizado.....	55
31.	Configuración del modelo de fluido y modelo de turbulencia.....	55
32.	Propiedades del fluido de trabajo (agua).....	56

33.	Condiciones de frontera. (a) inlet (entrada). (b) moving (móvil). (c) outlet (salida). (d) wall (pared).....	57
34.	Detalles de la configuración de la entrada (inlet).....	58
35.	Detalles de la configuración de la parte móvil (moving).....	58
36.	Detalles de la configuración de pared (wall).....	59
37.	Detalles de la configuración de salida (outlet).....	59
38.	Configuración de Solver Control.....	60
39.	Interfaz del ANSYS. Introducción del mallado en CFX Pre.....	61
40.	Tipo de análisis.....	62
41.	Configuraciones básicas del dominio fluidizado.....	62
42.	Configuración del modelo de fluido y modelo de turbulencia.....	63
43.	Propiedades del fluido de trabajo (agua).....	63
44.	Condiciones de frontera. (A) inlet (entrada). (B) Outlet (salida). (C) Wall (pared).....	64
45.	Detalles de la configuración de la entrada (inlet).....	65
46.	Detalles de la configuración de salida (outlet).....	65
47.	Detalles de la configuración de pared (wall).....	66
48.	Configuración de Solver Control.....	66
49.	Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.....	73
50.	Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.....	73
51.	Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.....	75
52.	Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.....	75
53.	Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la entrada del estator.....	78
54.	Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la salida del estator.....	78
55.	Representación de la variación de presión a través del estator mediante streamline.....	79
56.	Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del estator mediante streamline con rotor girando a 850 rpm.....	79

57. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la entrada del estator.....	81
58. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la salida del estator.....	81
59. Representación de la variación de presión a través del estator mediante streamline con rotor girando a 1750 rpm.....	82
60. Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del estator mediante streamline con rotor girando a 1750 rpm.....	82



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

SIMULACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO A TRAVÉS DEL DOMINIO FLUIDIZADO ROTOR-ÁLABES GUÍAS DE UNA BOMBA DE FLUJO AXIAL.

Autores: Leonardo J. Piña Chacón, Stefano Rufa Seijo.

Tutor: Prof. Ing. Gruber A. Caraballo

San Diego, Junio 2017

RESUMEN INFORMATIVO

El presente proyecto de trabajo de grado está basado en realizar la simulación del campo de flujo a través del dominio fluidizado rotor-álabes guías de una bomba axial. El funcionamiento de estas máquinas se analiza a través el estudio del fluido (en este caso agua) que las atraviesa, y por eso la finalidad de este trabajo de grado es simular mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) el fluido que atraviesa la máquina seleccionada, para observar que incidencia tiene sobre el fluido la presencia del conjunto de alabes guías en la salida el rotor, que efectos genera y determinar a través de tablas, imágenes y data, los resultados obtenidos. También se busca determinar los parámetros de funcionamiento de la bomba y partiendo de los resultados obtenidos, compararlos con otros estudios realizados y validarlos. Este trabajo se verá enmarcado en una investigación de tipo documental, ya que está basada en la interpretación, organización y análisis de artículos científicos e investigaciones realizadas anteriormente por otras fuentes, para generar una serie de datos y validarlos con la comparación de los resultados obtenidos. Aunado a todo este procedimiento científico que conlleva dicho proyecto, se encuentra dentro de sus objetivos, generar una alternativa viable y confiable para el estudio de las turbomáquinas, específicamente la bomba axial con álabes guías, para futuras investigaciones, generando un avance en materia científica, y al mismo tiempo, aportar a la comunidad estudiantil y de profesores de la Universidad José Antonio Páez un material de utilidad para las cátedras relacionadas con el ámbito. Adicionalmente se ahorrarían costos en cuanto al estudio por medio de la herramienta CFD, que permite un estudio bastante confiable sin la necesidad de construcción o compra de un banco de prueba experimental.

Descriptor: Dinámica de fluidos computacional (CFD), dominio fluidizado, rotor-álabes guías, Turbomáquinas, Bomba axial, fenómenos, cavitación, recirculación.

INTRODUCCIÓN

Una bomba de flujo axial, es un tipo común de bomba que consiste esencialmente en una hélice (un impulsor axial) en una tubería. Las bombas de flujo axial se usan más comúnmente en aplicaciones industriales donde se manejan grandes caudales a valores de cabeza de bombeo más bajos. Las paletas de la bomba de flujo axial están fijadas radialmente a una parte de cubo central del impulsor a través de la cual fluye fluido en la dirección axial. En esta bomba se utiliza una carcasa en forma de tubo en lugar de una carcasa de voluta. Uno de los métodos más útiles para aumentar su eficiencia es la instalación alabes guía.

El campo de flujo interno de la bomba de flujo axial es difícil de medir debido a la interacción rotor-estator. Por lo tanto, la dinámica de fluidos computacional (CFD) ha sido una herramienta eficaz en los estudios sobre el campo de flujo interno en hidrominería (bombas y turbinas). Por lo tanto, las simulaciones CFD se utilizarán para la simulación del campo de flujo a través del dominio fluidizado rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta que modela matemáticamente la solución de las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía de un fluido.

Este trabajo de grado describe el estudio detallado de flujos de fluido en una bomba axial que incluye impulsor y álabes guía., también las comparaciones de las simulaciones de flujo del impulsor de la bomba axial con álabes guía y sin álabes guía. Además, se analiza numéricamente el efecto del número de álabes de guía en los comportamientos de flujo y los fenómenos presentes en el interior de la máquina. Los resultados computacionales se realizan utilizando uno de los programas comerciales CFD, Solidworks Flow Simulation.

El informe se desarrolló en los siguientes capítulos:

Capítulo I: se plantea el análisis y formulación del problema, del mismo modo, se describe el objetivo general y los objetivos específicos a alcanzar en este proyecto, como también la justificación del porque se realiza este proyecto, el alcance que posee y sus limitaciones.

Capítulo II: se analizan y se exponen los antecedentes relacionados con la investigación, así como también los basamentos teóricos que servirán para el entendimiento y ejecución del presente proyecto.

Capítulo III: se desarrolla el marco metodológico en el cual se describen los métodos, técnicas y procedimientos para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos.

Capítulo IV: Detalla los resultados que se obtienen por medio de las fases metodológicas.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

El crecimiento a nivel mundial en las aplicaciones de las turbomáquinas hidráulicas en los procesos relacionados con el manejo de fluidos y su transportación a través de diferentes medios, bien sea la generación de energía, la fabricación de un producto o el sustento de un sistema sanitario, se ha transformado en una constante en la actualidad, lo que implica un amplio estudio e investigaciones en virtud de estas tecnologías para analizar su funcionamiento y un continuo mejoramiento. Dentro de esta amplia gama de lo que son las turbomáquinas se encuentra con que las bombas poseen un alto nivel de aplicación tanto en la sociedad común como en la industria. Estas se clasifican principalmente según la dirección de flujo en bombas de flujo axial, flujo radial y flujo radio axial, y cada una de estas describe un comportamiento particular del fluido en su interior, lo cual conlleva ciertas diferencias en su análisis.

Mataix (1986), las bombas axiales figuran dentro de las bombas rotodinámicas, cuya función es absorber energía mecánica y otorgarle al fluido que la atraviesa energía hidráulica. Estas bombas están compuestas por el rodete (alabes móviles), la caja espiral, el tubo difusor y la corona directriz o estator que consta de alabes fijos guías, no todas las bombas lo poseen, ya que esto encarece su costo, pero aumenta su eficiencia.

La interacción que se da en el interior de la máquina entre el fluido de trabajo y los componentes de esta le dan lugar a una variedad de fenómenos como lo son las pérdidas por fricción, el golpe ariete, la recirculación y la cavitación, los cuales tienen una influencia directa sobre el desempeño adecuado de la máquina, pudiendo

producir una caída de la eficiencia y hasta daños parciales en el equipo acortando su vida útil y hasta su avería total. Existen diversas formas de estudio las cuales se aplican para determinar los fenómenos presentes en el interior de la máquina. Una de estas es la aplicación de modelos matemáticos y ecuaciones las cuales permiten obtener resultados aproximados a la realidad, pero no en su totalidad ya que en este estudio los modelos son aplicados a sistemas idealizados y estandarizados por múltiples fabricantes, bajo condiciones específicas, lo que nos limita a solo poder analizar los fenómenos determinados por modelos algebraicos.

Otra alternativa es el estudio por medio de bancos de flujo, que consiste en una instalación del equipo en el cual este se hace operar bajo unas condiciones específicas asignadas por los investigadores. Este método permite alcanzar resultados muy cercanos a la realidad, pero acarrear un gran costo en su implantación y mantenimiento. Esta gran limitación le da lugar a la invención y el crecimiento de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) que nos permite a través de un software realizar un análisis de modelos mecánicos (fenómenos físicos – matemáticos) aplicados a los fenómenos que se suscitan en el interior de las bombas cuando un fluido las atraviesa y así determinar su comportamiento bajo las condiciones establecidas y los parámetros de diseño del equipo.

El determinar los distintos fenómenos que se presentan en el interior de una bomba de flujo axial con rotor y alabes guías a través de la simulación se vuelve imprescindible ya que esto va a tener un impacto significativo en la determinación de las condiciones de funcionamiento del equipo, para alcanzar una alta eficiencia y una operación optima que reduzca el riesgo de averías en los componentes. En consonancia con lo mencionado anteriormente, se plantea el estudio mediante herramientas CFD aplicado a la simulación y el análisis del campo de flujo existente a través del conjunto rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial, sometiendo a comparación los resultados obtenidos de la simulación, con los resultados experimentales obtenidos en otros estudios existentes y así lograr la validación de estos o la generación de hipótesis si es necesario, establecer los parámetros de

correcto funcionamiento de la máquina, y generar una alternativa confiable para el estudio de bombas axiales y sus diferentes zonas de trabajo internas.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo determinar el comportamiento del campo de flujo y de los fenómenos que este experimenta, cuando atraviesa el conjunto interior rotor-alabes guías de una bomba axial que se encuentra operativa, sin la disposición de una instalación de un banco experimental de pruebas?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Simulación del campo de flujo a través del dominio fluidizado rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros dimensionales e hidráulicos de una bomba axial.
- Diseñar el modelo de la máquina a simular mediante una herramienta CAD.
- Discretizar el dominio y fijar las condiciones de frontera del campo de flujo según la geometría.
- Realizar la simulación del flujo a través del impulsor de una bomba axial y obtener los resultados en forma de gráficas y/o tablas de las variables descriptivas del fenómeno.
- Validar los resultados comparándolos con los obtenidos por ensayos experimentales realizados anteriormente y/o formular las hipótesis en base a los principios de conservación.

1.4 Justificación de la Investigación

Ésta presente investigación tiene como objetivo principal simular el campo de flujo a través del dominio fluidizado rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial, este objetivo tiene como importancia realizar un estudio completo y eficaz a través de una herramienta de flujo computacional de CFD de los fenómenos que se presentan en el interior de las bombas cuando un fluido pasa a través de ellas. Utilizando esta simulación de fluidos se podrá apreciar diferentes fenómenos y problemas que se puedan estar presentando dentro del interior de la bomba como cavitación, pérdidas

por fricción y recirculación, que pueden afectar de forma permanente el impulsor de la bomba y otros elementos constitutivos, también provocando esto baja eficiencia y bajo desempeño a la máquina, como también daños en el equipo reduciendo su vida útil. Con esta herramienta de simulación de CFD se estaría solucionando toda esta problemática mencionada, como procurar el aumento de su eficiencia global implicando un gran ahorro económico ya que se evita la necesidad de construir modelos a escalas que cumplan con las leyes de semejanzas de las bombas y al mismo tiempo se evita la necesidad de construir bancos de ensayos siendo estos muy costosos para la construcción.

El campo de flujo interno de la bomba de flujo axial es muy difícil de medir debido a la interacción rotor-alabes guías, por lo tanto, la dinámica de fluidos computacional CFD es la herramienta adecuada y eficaz para este estudio de flujo interno que se estará realizando.

1.5 Limitaciones

Las limitaciones que estarán presentes durante la realización de esta investigación son las siguientes:

Poco conocimiento acerca del estudio de simulación de dinámica de fluidos computacional, ya que en la Universidad José Antonio Páez no lo implementan como una materia y esto obliga a realizar un curso de simulación para poder aprender sobre esta herramienta de CFD.

Falta de un banco de pruebas para bombas axiales en las instalaciones de la Universidad José Antonio Páez y de esta manera se debe a realizar este estudio del campo de flujo a través del dominio fluidizado rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial utilizando software de simulación de fluidos. También se necesita mucho más tiempo para poder realizar esta simulación, la cual se tendrá que emplear de una manera que se pueda culminar en los tiempos establecidos para la elaboración de esta investigación. Es muy costoso realizar este estudio de campo de flujo de bombas axiales a través de un banco de pruebas ya que posee limitaciones bastante importantes basadas en falta de presupuestos para la fabricación y su mantenimiento.

1.6 Alcance

Con la realización de este trabajo bajo los parámetros y objetivos establecidos ya antes mencionados podremos tener una simulación concreta y eficaz de lo que es el campo de flujo a través del dominio fluidizado rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial, y a su vez poder prevenir fallas en el equipo e incrementar la eficiencia de este.

También será un gran alcance para nuestra escuela de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez ya que no se cuenta con esta información de suma importancia, de igual manera será de gran beneficio y ayuda contar con este material sea de apoyo tanto para profesores y estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

La aplicación del estudio y análisis del comportamiento de un fluido que atraviesa por el interior de una turbomáquina se ha convertido en un punto fundamental en representación de los avances científicos y tecnológicos a nivel de la ingeniería mecánica, ya que cada día aumenta la escala de globalización del uso de estos equipos. Partiendo de este motivo, la dinámica de fluidos computacional (CFD) ha proporcionado grandes ventajas y avances para el estudio propicio y eficaz de estos fenómenos, dando lugar a múltiples investigaciones y artículos científicos que se citan a continuación:

Aung Kyaw Soe, Zin Win Ei, Myat Soe (2015), realizaron en el departamento de ingeniería mecánica de la universidad tecnológica de Mandalay, un artículo científico titulado “**Análisis numérico de flujo de una bomba de flujo axial**”. Este artículo describe el estudio de los flujos de fluidos en una bomba axial que incluye alabes del impulsor y alabes guías. Se realizan comparaciones entre la simulación del flujo en una bomba axial con alabes guías y sin alabes guías. Además de esto, también se analiza numéricamente el efecto que tiene en el fluido el número de alabes guías del estator. Estas simulaciones se realizan con el programa comercial de CFD, Solidworks Flow Simulation. Los datos de diseño de entrada de la bomba modelo son la velocidad de flujo de 0.2m^3 , cabeza de 3m y la velocidad de rotación de 1160 rpm. El diámetro exterior e interior del impulsor es 0,3 m y 0,15 m respectivamente. Y el impulsor con cuatro cuchillas se usa en el presente documento. El número de guías de la hoja se varía para 5, 7, 9 con los mismos datos de entrada y otros parámetros geométricos a mantener constante. En este estudio, se analiza la naturaleza de las

velocidades y presiones en una bomba de flujo axial. Las comparaciones se promedian las velocidades de flujo, subida de presión estática, presión dinámica y la presión total.

Así mismo, Montevideo Z. Nehomar, Duarte T. Arnaldo D., Caraballo V. Gruber A., (2013) realizaron en el departamento de térmica y energética de la escuela de ingeniería mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, un artículo científico titulado “**Análisis numérico del campo de Flujo a través del dominio**

guía ajustable (AGV) se propone en este trabajo. Esta paleta puede reducir pérdidas hidráulicas y mejorar el rendimiento de una bomba de flujo axial. Se obtuvo la fórmula de ajuste de AGV después de un análisis teórico. El flujo de fluido dentro de la bomba de flujo axial con una paleta de guía fija y paleta de guía ajustable fue simulado. Las curvas QH calculados para la paleta de guía fijo coincidieron bien con los experimentales. Los resultados muestran que el ángulo de ataque y la separación de flujo tienen una importante contribución a los vórtices que crean pérdidas hidráulicas en el canal de guía de paletas. El AGV puede disminuir pérdidas hidráulicas y mejorar significativamente la cabeza de la bomba y la eficiencia cambiando el ángulo de álabe.

Por último, Blanco, E. y Fernández-Vina, F. y Fernández-Oro, J. y Scanlon, T.J. y Stickland, M.T, (2002) realizaron este artículo científico titulado “**Análisis numérico de una bomba semiaxial**”, en la universidad de Strathclyde, Glasgow. Este artículo presenta el estudio del flujo turbulento tridimensional a través de una bomba semiaxial. El rodete tiene cinco alabes montados en un cubo cónico y el estator nueve alabes en un difusor cuya misión es devolver la dirección axial al flujo en la salida de la bomba. Estas pruebas se realizaron con aire, dando un caudal de 1.01 m³/s y 250 Pa a una velocidad de 1200 rpm. Los resultados obtenidos muestran una razonable concordancia con los datos experimentales, como se detalla en las comparaciones de altura de elevación-caudal y en los campos de flujo numéricos y experimentales. Esto permite confirmar que fenómenos transitorios tan complejos pueden ser razonablemente estudiados y comprendidos mediante la utilización de códigos CFD comerciales.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Fluido

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar cuán pequeño sea ese esfuerzo. Una fuerza cortante es el componente de fuerza tangente a una superficie, y esta fuerza dividida por el área de la superficie es el esfuerzo cortante promedio sobre el área. El esfuerzo

cortante en un punto es el valor límite de la fuerza cortante al área cuando esta se reduce al punto.

2.2.2 Propiedades de los fluidos.

· **Densidad**

La densidad de un fluido se define como la masa por unidad de volumen. Una peso por unidad de volumen. Se define como:

$$(2.1)$$

Donde g es la gravedad local. Las unidades de peso específico son N/m^3 . Para el agua se utiliza el valor nominal de $9800 N/m^3$. Con frecuencia se utiliza la gravedad específica para determinar el peso específico o densidad de un fluido (en general un líquido). Se define como la relación de la densidad de una sustancia con la del agua a una temperatura de referencia de $4^\circ C$.

· **Viscosidad**

La viscosidad puede ser considerada como una de las propiedades que influye en la potencia necesaria para mover una superficie aerodinámica a través de la atmosfera. Responde las pérdidas de energía asociadas con el transporte de fluidos en ductos, canales y tuberías. Además, la viscosidad desempeña un papel primordial en la generación de turbulencia. La viscosidad es una propiedad sumamente importante en el estudio de flujos. La velocidad de deformación de un fluido está directamente ligada a su viscosidad. Con un esfuerzo dado, un fluido altamente viscoso se deforma más lentamente que un fluido de baja densidad. Para un campo de flujo la viscosidad del fluido se define mediante la relación:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.2)$$

es la velocidad en la dirección perpendicular a $\frac{dv}{dy}$ o Pa, y de μ son $N.s/m^2$. La cantidad es un gradiente de velocidad y puede ser interpretado como una velocidad de deformación.

2.2.3 Flujo.

En la descripción de un campo de flujo conviene pensar en partículas individuales, cada una de las cuales se considera como una pequeña masa de fluido,

que se mueve junto con el flujo. Si el fluido es incompresible, el volumen no cambia de magnitud pero puede deformarse. Si el fluido es compresible, o si el volumen se deforma, también cambia de magnitud. En ambos casos se considera que las partículas se desplazan a través de un campo de flujo como una entidad.

2.2.4 Tipos de flujo.

El flujo se puede clasificar de muchas maneras, tales como turbulento, laminar, real, ideal, reversible, irreversible, constante, inconstante, uniforme, no uniforme, rotacional, no rotacional o irrotacional.

· Flujo Turbulento

Las situaciones de flujo turbulento son más usuales en la práctica de ingeniería. En el flujo turbulento las partículas del fluido (pequeñas masas molares) se mueven en trayectorias muy irregulares que causan intercambio de cantidad de movimiento de una porción del fluido a otra. Las partículas de un fluido pueden variar en tamaño, desde uno muy pequeño (de unos cuantos miles de moléculas) hasta uno muy grande (miles de pies cúbicos en un remolino grande de un río o en una ventolera atmosférica). En una situación en la que un flujo podría ser turbulento o no turbulento (laminar), la turbulencia establece mayores esfuerzos cortantes en todo el fluido y causa más irreversibilidades o pérdidas. También, en el flujo turbulento, las pérdidas varían con la potencia de la velocidad de 1,7 a 2; en flujo laminar, varían proporcionalmente a la primera potencia de la velocidad.

· Flujo Laminar

En flujo laminar, las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias suaves en láminas, o capas, con una capa deslizándose suavemente sobre una capa adyacente. El flujo laminar es gobernado por la ley de viscosidad de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la rapidez de deformación angular. En el flujo laminar, la acción de la viscosidad amortigua las tendencias a la turbulencia. Dicho

flujo no es estable en situaciones en las que hay combinaciones de baja viscosidad, alta velocidad, grandes avenidas de fluido, y se descompone en flujo turbulento.

- **Flujo Ideal**

Un fluido ideal no tiene fricción, es incompresible y no debe confundirse con un gas ideal. La suposición de un fluido ideal es útil en el análisis de situaciones de flujo que comprenden grandes extensiones de fluidos, como en el movimiento de un avión o un submarino. Un fluido sin fricción no es viscoso y sus procesos de flujo son reversibles. La capa de fluido en el área inmediata a una frontera de flujo real que ha visto su velocidad relativa a la frontera por un corte viscoso se llama capa límite. Las capas límites pueden ser laminares o turbulentas, dependiendo generalmente de su longitud, la viscosidad, la velocidad del flujo cerca de ellas, y la aspereza de la frontera.

- **Flujo Adiabático**

El flujo adiabático es aquel flujo de un fluido en el que no hay transferencia de calor desde el fluido hacia este. El flujo adiabático reversible (adiabático sin fricción) se denomina flujo isentrópico.

- **Flujo Permanente**

El flujo a régimen permanente ocurre cuando las condiciones en cualquier punto del fluido no cambian con el tiempo. Por ejemplo, si la velocidad en cierto punto es de 3 m/s en la dirección + en flujo a régimen permanente, permanece exactamente en esa cantidad y en esa dirección indefinidamente. Esto se puede expresar como , en la que el espacio (coordenadas del punto) se mantiene constante.

- **Flujo no Permanente**

El flujo se desarrolla a régimen no permanente cuando las condiciones en cualquier punto cambian con el tiempo, un sistema fijo con una rapidez creciente es un ejemplo de flujo a régimen no permanente.

- **Flujo Uniforme**

El flujo uniforme ocurre cuando, en todo punto, el vector de velocidad es idénticamente el mismo (en magnitud y dirección) para cualquier instante dado. En forma de ecuación, $\frac{dV}{dt} = 0$ en la que el tiempo se mantiene constante y s es un desplazamiento en cualquier dirección. La ecuación establece que no hay cambio en el vector de velocidad en cualquier dirección a través del fluido en cualquier instante.

- **Flujo no Uniforme.**

El flujo en que el vector de velocidad varía de lugar a lugar en cualquier instante ($\frac{dV}{dt} \neq 0$) es flujo no uniforme. Un líquido que se bombea a través de un tubo largo recto tiene flujo uniforme. Un líquido que fluye a través de una sección de reducción o a través de un tubo curvo tiene flujo no uniforme.

- **Flujo Rotacional**

La rotación de una partícula fluida en torno a un eje dado, por ejemplo el eje z , se define como la velocidad angular promedio de dos elementos de línea infinitesimales en la partícula que están en ángulo recto el uno con el otro y con el eje dado. Si las partículas de fluido dentro de una región tienen rotación en torno a cualquier eje, el flujo se llama flujo rotacional, o flujo de vórtice. Si el fluido dentro de una región no tiene rotación, el flujo se llama irrotacional.

- **Flujo Unidimensional**

El fluido unidimensional no considera variaciones o cambios en la velocidad, presión, etc., transversales a la dirección del flujo principal. Las condiciones en una sección transversal se expresan en términos de valores promedio de velocidad, densidad y otras propiedades. El flujo a través de un tubo, por ejemplo, puede en general caracterizarse como unidimensional.

- **Flujo Bidimensional**

En un flujo bidimensional se supone que todas las partículas fluyen en planos paralelos a lo largo de trayectorias idénticas en cada uno de estos planos; de aquí que no haya cambios en el flujo normal a estos planos.

- **Flujo Tridimensional**

El flujo tridimensional es el flujo más general en el cual los componentes de velocidad en direcciones mutuamente perpendiculares son funciones de coordenadas de espacio y tiempo y los métodos de análisis son en general matemáticamente complejos y solo se pueden tratar fronteras de flujo con geometría simple.

2.2.5 Máquinas generadoras o bombas

Se les define como máquinas generadoras a aquellas que transmiten la energía al fluido mediante el movimiento de un elemento rotatorio llamado impelente y que obliga al fluido a moverse de forma acelerada por su interior. Atendiendo a la trayectoria del fluido por el interior del impelente, las máquinas dinámicas se subdividen en centrífugas, axiales y de flujo mixto.

- **Bombas centrífugas.**

En estos equipos, por la acción de las fuerzas centrifugas el fluido es desplazado en forma radial desde el eje de rotación del impelente hacia la periferia. Durante este recorrido del fluido, los álabes del impelente le transmiten energía en forma de presión y velocidad al mismo. Parte de esta última es transformada en presión en el colector que rodea al impelente, ya que las altas velocidades provocan grandes pérdidas por fricción y disminuyen la eficiencia de la bomba. (Ver figura 1).

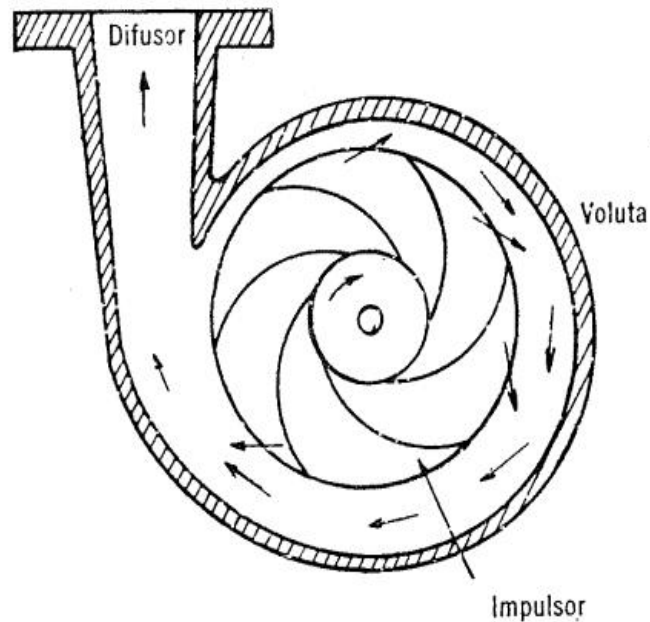


Figura 1. Esquema de una bomba centrífuga

Fuente: Humberto Torio García. (2014).

Bombas axiales

Son equipos que permiten la transferencia de energía mecánica del impelente al líquido mientras éste pasa en dirección axial o paralela al eje de rotación. Los álabes en este caso se encuentran fijos por un extremo al rotor, y al girar obligan al fluido a moverse axialmente al tiempo que le imprimen presión y velocidad, como puede observarse en la figura 2. Comparadas con las máquinas centrífugas, estas se caracterizan por posibilitar el manejo de grandes volúmenes de fluido, pero no producen grandes elevaciones de presión.

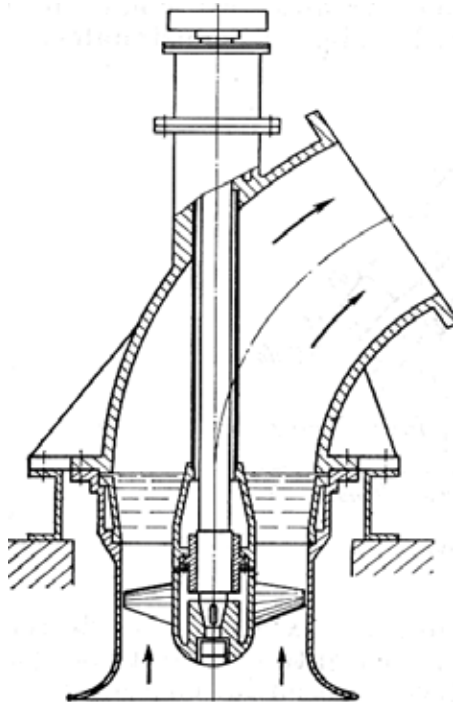


Figura 2. Esquema de una bomba axial vertical de una etapa
Fuente: Humberto Torio García. (2014).

- **Bombas de flujo mixto.**

Estos equipos representan la transición entre las máquinas centrífugas y axiales. En este caso el fluido abandona el impelente con un cierto ángulo de inclinación respecto al eje de rotación de la máquina. Estos equipos permiten mayores flujos que los centrífugas y mayores presiones que los axiales.

Humberto Torio García. Universidad Veracruzana, enero 2014. Quien realizo este articulo para obtener el título de ingeniero mecánico electricista, tema propuesto por el Ing. Juan Rafael Mestizo. En esta oportunidad nos menciona sobre las maquinas generadoras o bombas la cual nos dicen que transmiten la energía al fluido mediante el movimiento de un elemento rotatorio, también como están clasificadas ya sea en centrífugas, axiales y de flujo mixto.

2.2.6 Clasificación de las bombas rotodinámicas.

- Según la dirección de flujo: bombas de flujo radial, de flujo axial y de flujo radioaxial.

- Según la posición del eje: bombas de eje horizontal, de eje vertical y de eje inclinado.
- Según la presión engendradora: bombas de baja presión, de media presión y de alta presión.
- Según el número de flujos en la bomba: de simple aspiración o de un flujo y de doble aspiración, o de dos flujos.
- Según el número de rodets: de un escalonamiento o de varios escalonamientos

2.2.7 Elementos constitutivos de una bomba.

- Rodete, que gira solidario con el eje de la máquina y consta de un cierto número de álabes que imparten energía al fluido en forma de energía cinética y energía de presión.
- Corona directriz o corona de álabes fijos, que recoge el líquido del rodete y transforma la energía cinética comunicada por el rodete en energía de presión, ya que la sección de paso aumenta en esta corona en la dirección del flujo.
- Caja espiral, que transforma la energía dinámica en energía de presión, y recoge además con pérdidas mínimas de energía el fluido que sale del rodete, conduciéndolo hasta la tubería de salida o tubería de impulsión.
- Tubo difusor troncocónico, que realiza una tercera etapa de difusión o sea de energía de transformación de energía dinámica en energía de presión.

2.2.8 Bombas axiales

· Características generales

Las bombas centrífugas son máquinas radiales que operan de manera más eficaz en aplicaciones que requieren altas cargas y caudales relativamente bajos. Con esta combinación carga – caudal, por lo común se obtienen velocidades específicas menores que 4000. Para muchas aplicaciones, como las asociadas con drenaje e irrigación se requieren caudales altos y cargas bajas, por lo que las bombas centrífugas no es adecuada. En este caso, las bombas axiales son de uso común. Este tipo de bombas consta de una hélice confinada en una caja cilíndrica, razón por la cual también suelen denominarse bombas de hélice. Para este tipo de bombas el flujo es esencialmente en dirección axial (paralela al eje de rotación), en oposición al flujo

radial en la bomba centrífuga. En tanto que la carga desarrollada por una bomba centrífuga incluye una contribución debido a la acción centrífuga, la carga desarrollada por una bomba axial se debe principalmente a la fuerza tangencial ejercida por las aspas del rotor sobre el fluido.

Con la creciente aplicación de una bomba de flujo axial, la mejora de su eficacia sigue siendo cada vez más importante. Uno de los métodos más útiles para aumentar su eficiencia es la instalación de una paleta guía detrás del impulsor de la bomba, las aletas guías pueden desarrollar la cabeza de la bomba mediante la transformación de la energía cinética de los flujos giratorios a la energía de presión. El campo de flujo interno de la bomba de flujo axial es difícil de medir debido a la interacción rotor-estator. Por lo tanto, la dinámica de fluidos computacional (CFD) ha sido una herramienta eficaz en los estudios sobre el campo de flujo interno en hidrominería (bombas y turbinas). Por lo tanto, las simulaciones CFD se utilizaron para investigar las condiciones de flujo de una bomba de flujo axial en este estudio.

El rotor está conectado a un motor a través de un eje, y a medida que gira el fluido es aspirado a través de la entrada. Por lo común el fluido descarga, a través de una hilera de álabes fijos usados para enderezar el flujo que sale del rotor. Algunas bombas axiales también poseen álabes fijos en la entrada corriente arriba de la hilera del rotor y algunas son de etapas múltiples en las que las aspas giratorias y las aspas fijas están dispuestas en serie.

Sr. Aung Kyaw Soe, Dr. Zin Ei Win, Dr. Myat Soe. Julio 2015. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Mandalay, Myanmar. Realizaron un artículo científico titulado “Análisis numérico de flujo de una bomba de flujo axial”. En este artículo hablan sobre la bomba axial y las características generales la cual poseen estas bombas y sus aplicaciones. Menciona que este tipo de bombas consta de una hélice confinada en una caja cilíndrica, razón por la cual también suelen denominarse bombas de hélice y también muestran en las imágenes siguientes (ver figuras 3 y 4), un modelo de vista isométrica de un impulsor axial y una de un impulsor axial de la bomba con álabes guía.

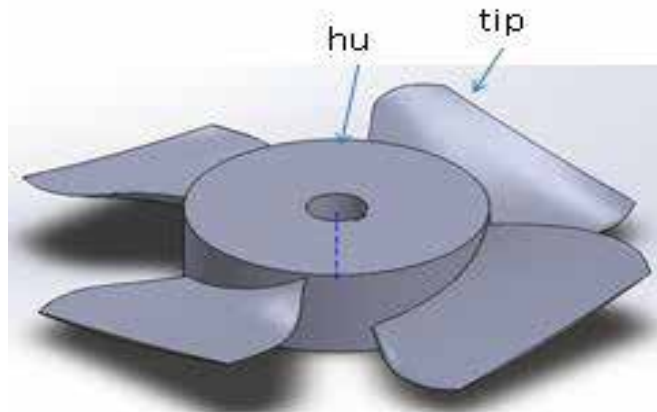


Figura 3. La vista isométrica de un impulsor axial de la bomba.

Fuente: Sr. Aung Kyaw Soe, Dr. Zin Ei Win, Dr. Myat Soe. (2015).

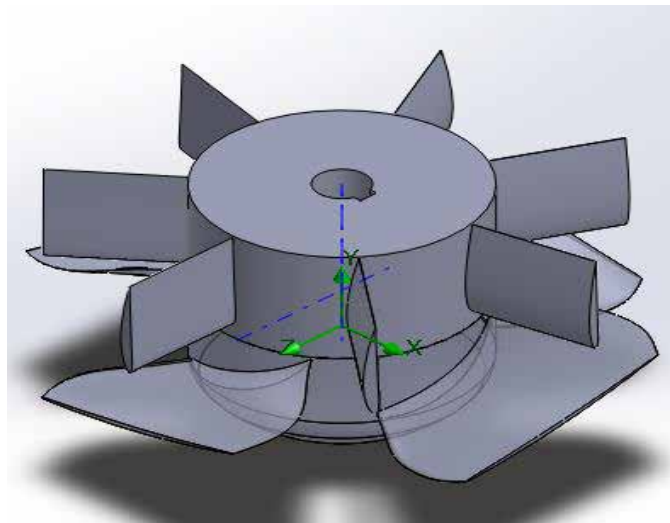


Figura 4. La vista isométrica de un impulsor axial de la bomba con álabes guía

Fuente: Sr. Aung Kyaw Soe, Dr. Zin Ei Win, Dr. Myat Soe. (2015).

En la figura 5 se comparan las características de carga, potencia y eficiencia para una bomba centrífuga y una bomba axial. Se observa que a capacidad de diseño (eficiencia máxima) la carga y la potencia al freno son las mismas para ambas bombas. Pero que a medida que disminuye el caudal, la potencia de entrada a la bomba centrífuga disminuye hasta 180 hp en condiciones de cierre, en tanto que para la bomba axial la potencia de entrada aumenta a 520 HP en condiciones de cierre. Esta característica de la bomba axial puede producir sobrecarga del motor si el caudal se reduce significativamente con respecto a la capacidad de diseño. También se observa que la curva de carga para la bomba axial es mucho más pronunciada que

para la bomba centrífuga. Así, con bombas axiales habrá un gran cambio de la carga con un pequeño cambio en el caudal, en tanto que en la bomba centrífuga, con su curva de carga relativamente plana, solo hay un pequeño cambio de la carga con grandes cambios en el caudal. Además, se observa que, excepto a capacidad de diseño, la eficiencia de la bomba axial es menor que la de la bomba centrífuga.

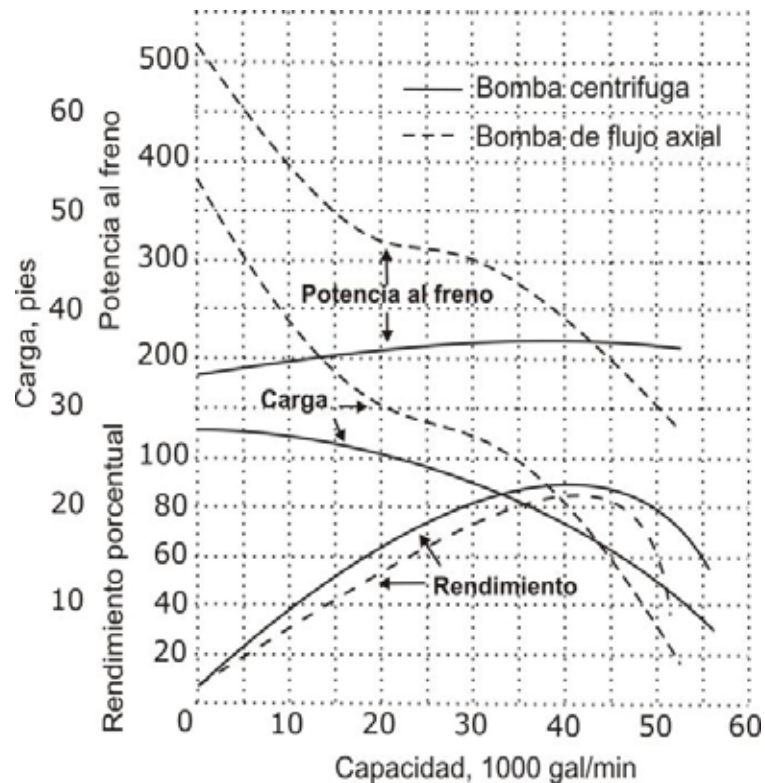


Figura 5. Comparación de las características entre las bombas centrífuga y axial
Fuente: Humberto Torio García. (2014).

Diagrama de velocidades.

En la figura 6 se muestra el diagrama de velocidad de una bomba de flujo axial, no hay flujo radial y las partículas de fluido abandonan el impulsor por el mismo radio por el cual entraron, de modo que $u_1 = u_2 = u$. El flujo entra en dirección axial y ataca el alabe móvil en esa misma dirección. La componente axial de la velocidad conserva el mismo valor entre la entrada y la salida, lo que facilita mucho la relación entre las distintas componentes y por consiguiente el análisis y diseño de la máquina.

La velocidad absoluta aumenta a su paso por el alabe móvil, esto es $v_2 > v_1$, también $w_2 < w_1$ logrando debido a la curvatura de los alabes.

El alabe fijo endereza y reduce la velocidad absoluta, cumpliendo con la función de dirigir el fluido y convertir parte de la energía dinámica del fluido en estática.

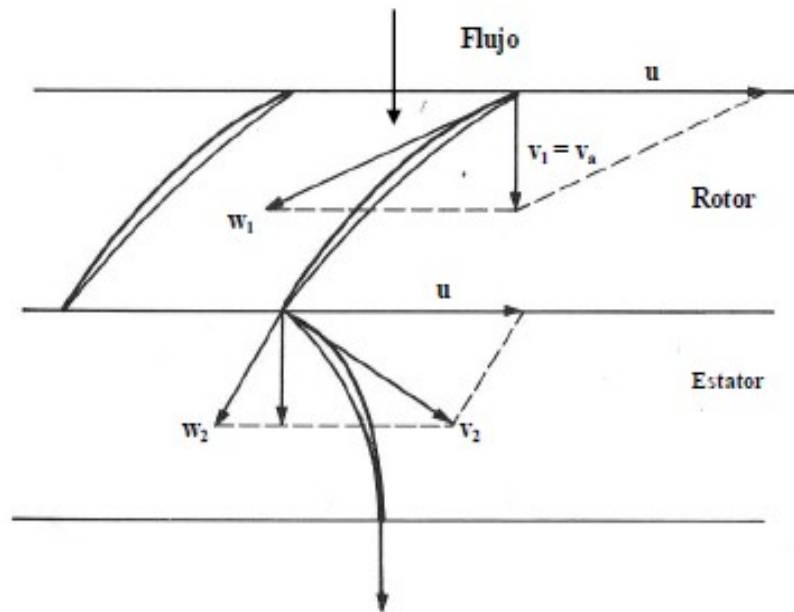


Figura 6. Diagrama de velocidades a la entrada y salida del rotor.

Fuente: Humberto Torio García. (2014).

· **Curvas características**

Las características de las bombas axiales se definen como funciones del caudal. Generalmente, la característica de carga presenta una zona de inestabilidad que aparece para valores del 50 % del de la capacidad de diseño en la cual la incidencia del líquido es tal que no se produce empuje útil del alabe. Naturalmente el caudal de diseño está en la segunda parte de la curva que corresponde a grandes gastos y pequeñas cargas, como es normal en las bombas axiales.

La característica de potencia generalmente muestra una tendencia decreciente en la zona de trabajo, lo cual hace aconsejable el empleo de este tipo de máquinas para trabajar en sistemas de baja resistencia hidráulica. La potencia de caudal nulo es muy alta en estas bombas, de 2 a 3 veces mayor que la potencia de diseño, debido a

un fuerte efecto de recirculación. Exigen así una fuerte potencia extra en el arranque, la cual baja rápidamente a medida que el gasto va aumentando. Se produce una inflexión en la zona de inestabilidad y la potencia vuelve a disminuir hasta alcanzar las condiciones de régimen de trabajo para que esta proyectada la máquina.

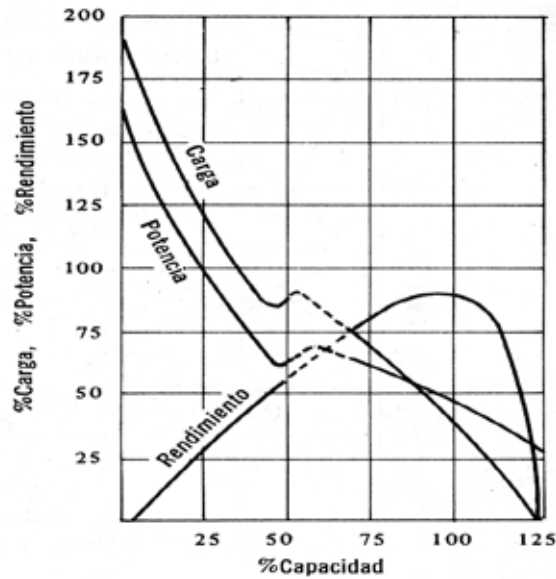


Figura 7. Curvas características de una bomba axial
Fuente: Humberto Torio García. 2014.

Debido a la alta potencia de arranque es aconsejable no hacerla operar en sistemas que le exijan frecuentes arrancadas y, en cualquier caso, se debe contar con un dispositivo que permita al motor absorber esas sobrecargas, tal como se observa en la figura 7.

· **Velocidad específica.**

La velocidad específica de una unidad homologa es una cantidad muy usada en la selección y diseño preliminar de un cierto tipo de unidad. Por lo general su definición es diferente entre una bomba y una turbina.

La velocidad específica N_s , de una serie homologa de bombas se define como la velocidad de algún integrante de la serie que tiene un tamaño que trabaja a descarga y carga unitarias. La velocidad específica de una serie a menudo se define para el punto

de mejor eficiencia, es decir, para la velocidad, carga y descarga más eficientes, calculándose de la siguiente manera:

$$\frac{\quad}{\quad} \quad (2.3)$$

· **Altura de elevación.**

La altura de elevación (total) de la bomba es el incremento de energía adquirido por 1 kg de líquido entre la sección de entrada y de salida de la bomba misma; generalmente se indica con H y se mide en J/kg o en m de líquido transportado (m.c.l.). Es mucho más cómodo hablar no de altura de elevación sino de altura de elevación manométrica, indicada con H_{man} y medida en m.c.a. (metros de columna de agua): decir que determinada bomba da un caudal de 3 m³/h con una altura de elevación manométrica de 12 m.c.a., significa que esta bomba logra elevar una cantidad equivalente a 3 m³/h hasta una altura máxima de 12 m.

2.2.9 NPSH.

Uno de los conceptos más polémicos asociado con bombas es el NPSH. La comprensión de este concepto es esencial para la correcta selección de una bomba. Con el fin de caracterizar las condiciones para una buena "aspiración", se introdujo en la terminología de instalaciones de bombeo el término NPSH. Este concepto representa la disponibilidad de energía con que el líquido entra en la brida de succión de la bomba. El término NPSH es un término que se encuentra en publicaciones de lengua inglesa. En publicaciones de varios idiomas, se mantiene la designación del NPSH, aunque algunos autores usan el término "Altura Positiva Líquida de Succión" o "Altura neta positiva en la Succión".

Para efectos de estudio y definición, el NPSH puede ser dividido en el NPSH requerido y el NPSH disponible.

· **NPSH disponible.**

El NPSH disponible es una característica de la instalación en que la bomba opera, y de la presión disponible del líquido en el lado de succión de la bomba. El NPSH disponible puede ser calculado a través de la siguiente ecuación:

(2.4)

NPSH requerido.

El NPSH requerido es obtenido experimentalmente y es suministrado por el fabricante. La mayoría de las curvas características de las bombas incluyen la curva de NPSH requerido en función del caudal. Esta curva es una característica propia de la bomba y en rigor puede ser obtenida solamente en forma experimental en los bancos de prueba de los fabricantes. La expresión NPSH representa la energía como altura absoluta de líquido en la succión de la bomba por encima de presión de vapor de este líquido, a la temperatura desde bombeo, referida a la línea de centro de la bomba. Por consiguiente, el fin práctico del NPSH es el de poner limitaciones a las condiciones de succión de la bomba, de modo de mantener la presión en la entrada del rodete por sobre la presión de vapor del líquido bombeado. La presión más baja ocurre en la entrada del rodete, por consiguiente, si mantenemos la presión en la entrada del rodete por sobre la presión de vapor, no tendremos vaporización en la entrada de la bomba y evitaremos así el fenómeno de la cavitación. El fabricante define, de esta manera, las limitaciones de succión de una bomba mediante la curva de NPSH requerido.

Toda vez que la energía disponible iguale o exceda los valores de NPSH requerido, no habrá vaporización del líquido, lo que evitará la cavitación y las respectivas consecuencias; de esta manera, la bomba debe seleccionarse observando la siguiente ecuación:

(2.5)

En la siguiente figura 8 se puede observar la relación de las curvas de NPSH.

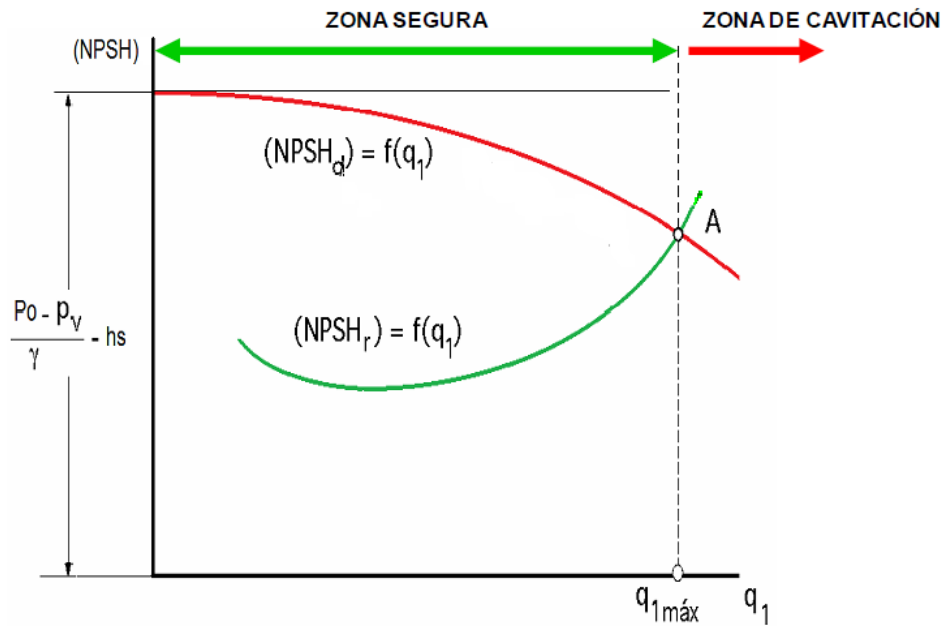


Figura 8 Relación entre curvas de NPSH.
Fuente: Humberto Torio García. (2014).

2.2.10 Leyes de semejanza para las bombas.

Las leyes de semejanza son sumamente importantes para las turbomáquinas en general, y las bombas como turbomáquinas hidráulicas generadoras siguen pues este patrón. Las leyes de semejanza para las bombas son seis. Las tres primeras leyes se refieren a cuando es la misma bomba (manteniendo constante el diámetro) y se hace variar el número de revoluciones o velocidad de giro.

Primera ley: los caudales son directamente proporcionales a los números de revoluciones, como se observa en la siguiente ecuación:

$$q_1 \propto n \tag{2.6}$$

Segunda ley: las alturas útiles son directamente proporcionales a los cuadrados de los números de revoluciones, como se observa en la siguiente ecuación:

$$H_u \propto n^2 \tag{2.7}$$

Tercera ley: las potencias útiles , de accionamiento o interna son directamente proporcionales a los cubos de los números de revoluciones, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2.8)$$

Las tres siguientes leyes se refieren a bombas geoméricamente semejantes, pero de diámetro distinto. La velocidad de giro se mantiene constante.

Cuarta ley: los caudales son directamente proporcionales al cubo de la relación de diámetros, tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (2.9)$$

Quinta ley: las alturas útiles son directamente proporcionales al cuadrado de la relación de diámetros, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (2.10)$$

Sexta ley: las potencias útiles, de accionamiento o interna son directamente proporcionales a la quinta potencia de la relación de diámetros, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad (2.11)$$

2.2.11 Ecuación de continuidad.

Primeramente se considera un flujo a régimen permanente a través de una porción del tubo de corriente de la siguiente figura:

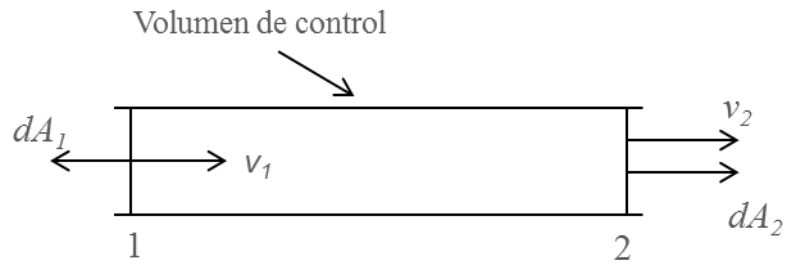


Figura 9. Flujo a régimen permanente a través de un tubo de corriente.

Fuente: Humberto Torio García. (2014).

El volumen de control comprende las paredes del tubo de corriente entre las secciones 1 y 2, más las áreas en los extremos de las secciones 1 y 2. Dado que el flujo es a régimen permanente, se obtiene:

$$(2.12)$$

lo que afirma que la masa neta de flujo que sale del volumen de control debe ser cero. En la sección 1 la masa neta de flujo que sale es:

$$(2.13)$$

Y en la sección 2 es:

$$(2.14)$$

Ya que no hay flujo a través de la pared del tubo de corriente, se obtiene:

$$(2.15)$$

La ecuación (2.16) representa la ecuación de continuidad aplicada a dos secciones a lo largo de un tubo de corriente en flujo a régimen permanente.

ρ_1 como la densidad promedio en la sección 1 y ρ_2 como la densidad promedio en la sección 2, se obtiene:

$$(2.16)$$

En la que v_1 y v_2 representan velocidades promedio sobre las secciones transversales y \dot{m} es la rapidez de flujo de masa. La velocidad promedio sobre una sección transversal está dada por:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.17)$$

Si definimos el caudal volumétrico por medio de la ecuación (2.4) y lo sustituimos en la ecuación de continuidad, se obtiene:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.18)$$

Para flujo incompresible en régimen permanente, se obtiene:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.19)$$

2.2.12 Ecuación de la energía.

La primera ley de la termodinámica para un sistema afirma que el calor agregado a un sistema, menos el trabajo realizado por este, depende solo de los estados inicial y final del sistema. La diferencia en los estados del sistema, siendo independiente de la trayectoria del estado inicial al final, debe ser una propiedad del sistema. Esta es llamada energía interna. La primera ley en forma de ecuación es:

$$Q - W = \Delta U \quad (2.20)$$

Partiendo de la ecuación (2.22) se obtiene:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \Delta u \quad (2.21)$$

El trabajo realizado por el sistema sobre sus alrededores puede desglosarse en dos partes: el trabajo realizado por fuerzas de presión sobre las fronteras en movimiento y el trabajo realizado por fuerzas cortantes tal como el par torsional ejercido sobre un eje en rotación. El trabajo realizado por fuerzas de presión en el tiempo dt es:

tradicionales métodos didácticos experimentales y análisis de modelos como para resolver problemas de flujo de fluidos. Esta reciente adopción del CFD ha sido a la vez inevitable y a la vez progresiva, pues los altos costos y el tiempo asociados con el consumo de la experimentación a menudo han impedido el deseo de producir eficiente profundidad en los resultados. La dinámica de fluidos computacional o simplemente CFD está relacionada con la obtención de la solución numérica de problemas de flujo de fluidos utilizando sistemas de cómputo.

Ojeda Escoto Pedro, López Parra Marcelo, Farah Simón Alejandro, Ramírez Reivich Alejandro. Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológico. Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2009. Realizaron un artículo basado en CFD como una herramienta para diseño de productos. Es esta parte habla sobre la dinámica de fluido computacional, como ya explicado es una herramienta que modela matemáticamente la solución de las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos El CFD se ha convertido actualmente en una poderosa herramienta, con cada solución se representa un vasto panorama de la física matemática, métodos numéricos, interfaces de usuarios y técnicas de visualización.

2.2.15 Fundamentos de CFD.

Ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos.

Las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos se consideran como formulaciones matemáticas de las leyes de la conservación de la Mecánica de Fluidos y se conocen como ecuaciones de Navier–Stokes. Cuando se aplican a un fluido continuo, estas leyes de la conservación relacionan el rango de cambio de una propiedad de un líquido deseado a fuerzas externas que se consideran como:

- a) La ley de la conservación de la masa (Continuidad).
- b) La ley de la conservación de momento (Segunda ley de movimiento de Newton).
- c) La ley de la conservación de energía (Primera ley de la termodinámica).

Haciendo cumplir estas leyes de conservación sobre volúmenes espaciales discretos en un dominio fluídico, es posible alcanzar un cálculo consecuente de los

cambios en la masa, momento y energía del flujo que cruza las fronteras del volumen en estudio.

2.2.16 Simulación en CFD.

- **Generación del modelo 3D.**

La generación de un modelo tridimensional CAD de la geometría del dominio fluídico es el primer paso para una simulación en CFD. El sólido debe mantener la geometría inicial y las características y propiedades relevantes para capturar el flujo, se puede pasar por alto detalles que a nivel de fabricación serían esenciales, pero desde el punto de vista de los procesos físicos que ocurren se considera de nula importancia

- **Mallado del dominio o discretización espacial.**

La discretización del dominio fluídico en pequeñas celdas llamadas elementos o volúmenes finitos es la segunda etapa. La forma de estos puede ser variada (tetraédrica, hexaédrica, prismáticas, etc.). Existen muchos métodos para la discretización del problema. Todos estos métodos requieren una previa discretización geométrica (espacial) para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Básicamente, existen dos tipos de mallados.

- **Mallas estructuradas:**

Cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices i, j, k , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D. La principal ventaja de los mallados estructurados reside en la ordenación de los elementos en memoria, ya que, de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Las mallas estructuradas pueden representar en un sistema cartesiano o curvilíneo. En el primer caso las líneas que configuran la celda son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados, por contrario, en los sistemas curvilíneos el sistema de coordenada es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio. Por otro lado, también pueden clasificarse en mallas ortogonales y en malla no

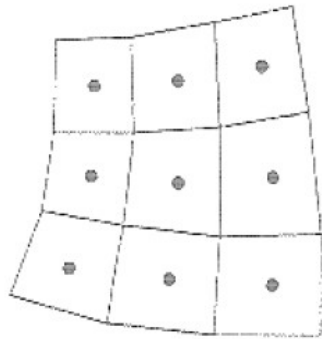
ortogonales. Las mallas octogonales son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90° .

· **Mallas no estructuradas:**

Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas y nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso. Son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D. la principal ventaja de los mallados no estructurados reside en que los triángulos (2-D) o los tetraedros (3-D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica son necesarios unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla. El tiempo requerido para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere que el que requiere para uno estructurado.

El tipo de discretización espacial a emplear, depende del tipo de discretización de las ecuaciones empleado, así como la estructura interna de datos empleados para resolver el flujo. El método de diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, requiere una malla estructurada de puntos en los que se guardan las variables de flujo. Por otro lado, en el método de los volúmenes finitos es necesario definir puntos de control en cada volumen generado. Precisamente es, en esos vértices donde se guardan las variables, que dependiendo del método que se emplee pueden ser definidos en el centro del elemento o en los vértices de las celdas. (Ver en la figura 10).

Centros de elementos



Centros de los vértices

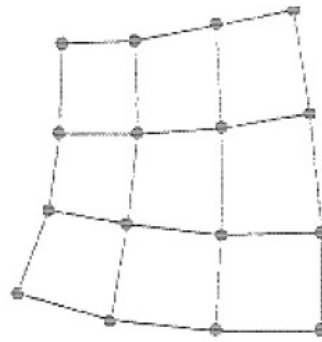


Figura 10. Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices.

Fuente: Ojeda Escoto, P., López Parra, M., Farah Simón, A., Ramírez Reivich, A. (2009)

· **Método de las diferencias finitas.**

Este fue el primer método aplicado para obtener la solución numérica de unas ecuaciones diferenciales. La primera persona en emplearlo fue Euler. Este método emplea el desarrollo de Taylor para la discretización de las derivadas de las variables de flujo. Una ventaja importante del método de las diferencias finitas es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas.

Por otro lado, este método requiere una malla estructurada, con lo cual el campo de aplicación se ve reducido a algunos problemas, normalmente con geometrías sencillas. Además, este método no puede aplicarse directamente en coordenadas curvilíneas, teniéndose que transformar las ecuaciones de Navier-Stokes de curvilíneas a cartesianas para la resolución del problema.

· **Método de los volúmenes finitos.**

Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de diferencias finitas.

Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es muchísimo más flexible (puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas); por este motivo, el método de volúmenes finitos es el método más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas. El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía.

- **Método de los elementos finitos.**

Como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler/Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares (en 2-D) o tetraédricos (en 3-D), generando una malla no estructurada. Dependiendo del tipo de elemento y de la precisión que se quiera, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. El número total de nodos multiplicado por el número de variables del problema es el número de grados de libertad del problema.

Además, tienen que definirse las llamadas funciones de forma que representan la variación de la solución en el interior de los elementos. En la práctica, se emplean normalmente funciones de forma lineales, que emplean únicamente los nodos pertenecientes a la malla. Las funciones de forma son distribuciones lineales de valor cero fuera del elemento correspondiente a la función. Esto da lugar, a una aproximación de segundo orden en la representación de los resultados. Este método resulta muy atractivo por el uso de mallas no estructuradas, que son ampliamente utilizadas para la formulación de problemas con geometrías complejas.

- **Resolución de ecuaciones**

Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía se resuelven en cada uno de los elementos de la malla. Puesto que las ecuaciones son en derivadas parciales, previamente hay que convertirlas en ecuaciones algebraicas (introduciendo errores numéricos de discretización) utilizando esquemas numéricos adecuados. Así se pasa de tener un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales sobre un espacio continuo (x, y, z, t) a un sistema finito de ecuaciones algebraicas con variables independientes discretas ($x[i], y[i], z[i], t[j]$). El número de ecuaciones a resolver es muy elevado. En los pasos intermedios de

discretización aparecen errores numéricos, además de los de redondeo debido al uso de un número finito de decimales, que deben tender a cero si se quiere que la solución numérica se asemeje a la real. Asociados a la cuantificación de errores se encuentran los conceptos de verificación y validación de los cálculos.

Se llama verificación del modelo a la comprobación de que las ecuaciones se están resolviendo de manera adecuada. Esto poco tiene que ver con la física y es solo una cuestión de cálculo numérico. La validación del modelo, por otro lado, consiste en determinar lo apropiado de usar las ecuaciones que realmente se resuelven como aproximación del modelo matemático del fenómeno físico.

Análisis de resultados

Regularmente, al análisis y post proceso de los resultados se le da una menor importancia de la que realmente tienen. Una vez resueltas las ecuaciones, se dispone de los valores de las variables que definen el problema en cada uno de los elementos de la malla. Si además el problema es no estacionario, se obtiene un conjunto de datos por cada paso de tiempo. Además de estos datos numéricos es posible obtener otra información como: geometría del dominio, graficas vectoriales y de partículas, gráficas de superficies en 2D y 3D, trayectorias de partículas, animaciones de los resultados dinámicos, entre otros.

Ojeda Escoto Pedro, López Parra Marcelo, Farah Simón Alejandro, Ramírez Reivich Alejandro. Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológico. Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2009. Realizaron un artículo basado en CFD como una herramienta para diseño de productos. Los autores de este artículo explican los fundamentos de CFD. Explicando las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos que forman parte de estos fundamentos y que se consideran como formulaciones matemáticas de las leyes de la conservación de la Mecánica de Fluidos, además de eso también hacen énfasis en la simulación en CFD. La cual se basa en la generación del modelo 3D, mallado del dominio o discretización espacial sean de mallas estructuradas o mallas no estructuradas y por ultimo sobre resolución de ecuaciones y análisis de resultados.

2.3 Definición de términos básicos.

En esta sección se mencionarán todos aquellos términos claves de carácter técnico relacionados con el contenido, los cuales se han incluido en la investigación y son de gran relevancia para el desarrollo de la misma ya que sirven de apoyo para su comprensión y respectiva consulta.

Álabes: Es la paleta curva de una turbomáquina o máquina de fluido rotodinámica. Forma parte del rodete y, en su caso, también del difusor o del distribuidor. Los álabes desvían el flujo, bien para la transformación entre energía cinética y energía de presión por el principio de Bernoulli, o bien para intercambiar cantidad de movimiento del fluido con un momento de fuerza en el eje.

Bomba rotodinámica: Es actualmente la máquina más utilizada para bombear líquidos en general. Las bombas centrífugas son siempre rotativas y son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor en energía cinética o de presión de un fluido incompresible.

CAD: El diseño asistido por computadoras, es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y diseñadores. Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo 2D y de modelado 3D. Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos.

Corona directriz: Es un elemento de álabes fijos solidario a la parte lateral de la caja espiral tiene la forma de una corona ubicado a la salida del rodete su función es la de orientar el flujo de salida del rotor hacia la caja espiral a fin de reducir las pérdidas de choque así mismo tiene la función de transformar la energía cinética en energía de presión.

Caja de espiral: Es la cubierta de la bomba además de servir como protector tiene la función de transformar energía cinética en energía de presión y tiene la forma de espiral.

Coordenadas curvilíneas: Un sistema de coordenadas curvilíneas es la forma más general de parametrizar o etiquetar los puntos de un

espacio localmente euclídeo o variedad diferenciable (globalmente el espacio puede ser euclídeo pero no necesariamente). Si tenemos un espacio localmente euclídeo M de dimensión m , podemos construir un sistema de coordenadas curvilíneo local en torno a un punto p .

Convergencia: Es la propiedad de dos o más cosas que confluyen en un mismo punto.

Discretización: Es la operación que permite separar en clases una serie de variables cualitativas o de variables cuantitativas. Esta operación simplifica la información agrupando los objetos geográficos que presentan las mismas características en distintas clases.

Dominio fluidizado: Se define como los espacios por donde pasa el fluido que no es sólido.

Entalpia térmica: Es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Etimología: Es una disciplina relacionada con la filología y con la lingüística histórica, que comprende el estudio del origen de las palabras mediante investigación de su significado original, de su estructura, así como de su: posibles cambios ocurridos en el transcurso del tiempo. Así mismo, para obtener alguna fuente directa, por ejemplo, la escritura, mediante métodos de lingüística comparativa se pueden reconstruir datos relativos a lenguas sumamente antiguas.

Ecuaciones algebraicas: Es un polinomio $P(x)$, con coeficientes reales o complejos, igualado a cero. Donde x denota un número desconocido que la satisface, esto es que reemplazado en $P(x)$ da cero como resultado. Cualquier número que satisface la ecuación se llama raíz; el problema de resolver una ecuación significa hallar todas sus raíces. Cuando el grado del polinomio es n se dice que la ecuación correspondiente es de grado n .

Émbolo: El émbolo es la pieza de una bomba o del cilindro de un motor que se mueve hacia arriba o hacia abajo impulsando un fluido o bien recibiendo el impulso de él.

Fenómenos físicos: Los fenómenos físicos son los cambios que sufre un cuerpo, materia o sustancia sin alterar su composición y ocurren cuando se lleva a cabo un proceso o cambio, que puede ser reversible, sin perder sus características, propiedades ni modificar su naturaleza.

Modelos mecánicos: Este asume que un sistema complejo puede comprenderse examinando el funcionamiento de sus partes y la manera en que se juntan. Los modelos mecánicos suelen tener un aspecto físico, tangible, en el cual los componentes del sistema son reales, sólidos y visibles.

Resistencia hidráulica: La resistencia hidráulica se caracteriza por una pérdida de presión (también denominada pérdida de carga) que el fluido sufre al circular por un conducto. Tiene el sentido físico de una pérdida de energía, por lo que se representará mediante un elemento resistencia.

Velocidad Absoluta: Es la variación de su vector de posición con respecto al tiempo observado desde un referencial fijo. El vector de posición puede variar en módulo (debido a una velocidad lineal) y dirección (debido a un giro, es decir, a una velocidad angular). Siempre que observemos desde un punto fijo percibiremos la misma velocidad pues es la variación del vector de posición lo que observamos y no el vector de posición en sí.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Luego de haber realizado una amplia investigación acerca de los aspectos teóricos y científicos más importantes relacionados con el tema de investigación, se procede a elaborar y describir la estrategia metodológica a seguir para dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

De acuerdo a Hurtado, I. Toro, J (2007):

El diseño del marco metodológico constituye la medula de la investigación. Se refiere al desarrollo propiamente dicho del trabajo investigativo: La definición de la población sujeta a estudio y la selección de la muestra, diseño y aplicación de los instrumentos, recolección de datos, la tabulación, el análisis y la interpretación de los datos. Es decir, aquí se indica la metodología que van a seguirse en la investigación para lograr los objetivos propuestos o para elaborar las hipótesis formuladas. (p.90).

3.1 Diseño de la Investigación

La investigación documental, tiene como objetivo, según Vélez S. (2001) que es:

El desarrollo de las capacidades reflexivas y críticas a través de análisis, interpretación y confrontación de la información regida. Entre los posibles propósitos de este tipo de investigación se encuentran: describir, mostrar, probar, persuadir o recomendar. La investigación debe llevar a resultados originales y de interés para el grupo social de la investigación (p.105).

A través del uso de esta estrategia se lograrán los objetivos propuestos en el trabajo de investigación, sustentada por la recolección de información obtenida de fuentes fidedignas relacionadas con el tema, llegando a la obtención de resultados concretos obtenidos de la simulación del fluido, y así poder interpretarlos y presentarlos exitosamente.

3.2 Tipo de Investigación

El tipo de investigación será seleccionado, bajo la premisa de dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la investigación siendo el modelo adecuado a seguir para lograr lo planteado de manera exitosa. Como lo define la Universidad José Antonio Páez en su manual de normativas (ob. cit), consiste:

El proyecto factible consistirá en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organización o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos. El proyecto factible debe tener apoyo en una investigación de tipo documental, de campo o un diseño que incluya ambas modalidades (p.5)

La realización del objetivo principal de este proyecto, lo convierte en un proyecto factible, ya que a través de dicha simulación se logrará obtener resultados los cuales tendrán un aporte significativo en cuanto a la colaboración en material científico para los avances y estudios en el área de los termofluidos, la dinámica de fluidos y la transferencia de calor en fenómenos de transporte, logrando adicionalmente un alcance en aporte para la facultad de ingeniería mecánica de la UJAP.

3.3 Nivel de la Investigación

Según Morales (2011) “El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno” (p.110). Así como también divide los niveles en tipos, siendo estos, Descriptivos, Explicativos y Exploratorios

Esta investigación se basa en llevar a cabo la simulación de un fluido a través del dominio fluidizado rotor-alabes guías de una bomba axial, la cual requiere una profunda investigación acerca de los estudios relacionados con bombas axiales y herramientas de simulación, para así poder abarcar los conocimientos necesarios y entrar en la aplicación de los modelos mecánicos para la simulación, determinando de una manera aproximada a la realidad los fenómenos que experimenta el fluido en el interior de una bomba, alcanzado resultados palpables y de ser necesario

desarrollar hipótesis. En concordancia con esto, el trabajo de investigación se enmarca como una investigación exploratoria.

3.4 Población y Muestra

La población puede definirse como un conjunto de individuos de la misma clase, limitada por el estudio. Según Tamayo y Tamayo, (1997), “La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” (p.114).

La muestra es un subconjunto de la población, es decir una parte de la población. La cual es capaz de generar los datos con los cuales se identifican las fallas dentro del proceso. Tamayo, T. Y Tamayo, M (1997), afirma que la muestra “es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico” (p.38).

Para la ejecución de la selección de población y muestra, se realizará en base a los beneficiados con la elaboración de dicho proyecto, lo que establece como población a la comunidad estudiantil y docente de la Universidad José Antonio Páez, y la muestra, será un muestreo de tipo estratificado, donde se selecciona a la comunidad de la escuela de Ing. Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, tanto estudiantes como docentes.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

Una técnica de recolección de información, señala Sabino (1992) “es cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información”. En el presente proyecto se llevará a cabo la aplicación de las siguientes técnicas:

- Revisión documental: Esta técnica se realizará con el fin de profundizar la información recopilada con todas las aplicadas anteriormente, esta comprende la búsqueda de la información de documentos empresariales, que contribuyan al conocimiento del comportamiento de sucesos realizados que sirvan de apoyo para el desarrollo de teorías pertinentes para la resolución de problemas. (Cándelo, 2006).

- Observación participativa directa: el autor haciendo acto de presencia en el campo de estudio es testigo del estado actual del área, con la finalidad de obtener y registrar información para su posterior análisis, de forma pasiva.
- Entrevistas no estructuradas: Obtener información a profundidad y exhaustiva en relación a una cantidad de aspecto y detalles. Al ser no estructurada, no dispone de una guía de preguntas sin embargo se orienta por unos objetivos preestablecidos.

3.6 Fases metodológicas

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

Fase I. Determinar los parámetros dimensionales e hidráulicos de una bomba axial.

Luego de una amplia investigación y documentación en base a múltiples artículos científicos y estudios de bombas axiales, se seleccionará una que será nuestro modelo a validar. Se van a determinar los parámetros dimensionales e hidráulicos de la bomba axial seleccionada para la aplicación de la investigación y los estudios, a fin de manejarlos como data necesaria para realizar los siguientes objetivos (Ver figura 11).

Los parámetros dimensionales para el rotor seleccionado para las simulaciones a realizar en esta investigación poseen cuatro álabes fijos con un diámetro externo de 351.9 mm y para el estator (alabes guías) posee siete alabes fijos con un diámetro externo de 351.9 mm. Las condiciones de operaciones del rotor-estator para las simulaciones que arrojarán como resultado las variaciones de presión y de velocidad relativa entre la entrada y la salida del impulsor y estator son mostradas en la siguiente tabla. (Ver tabla 1 y 2).

Tabla 1. Condiciones de operación del impulsor.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

Caudal	978,481 /h
Presión absoluta de entrada	100 KPA
Velocidad de giro	850 Y 1750 rpm

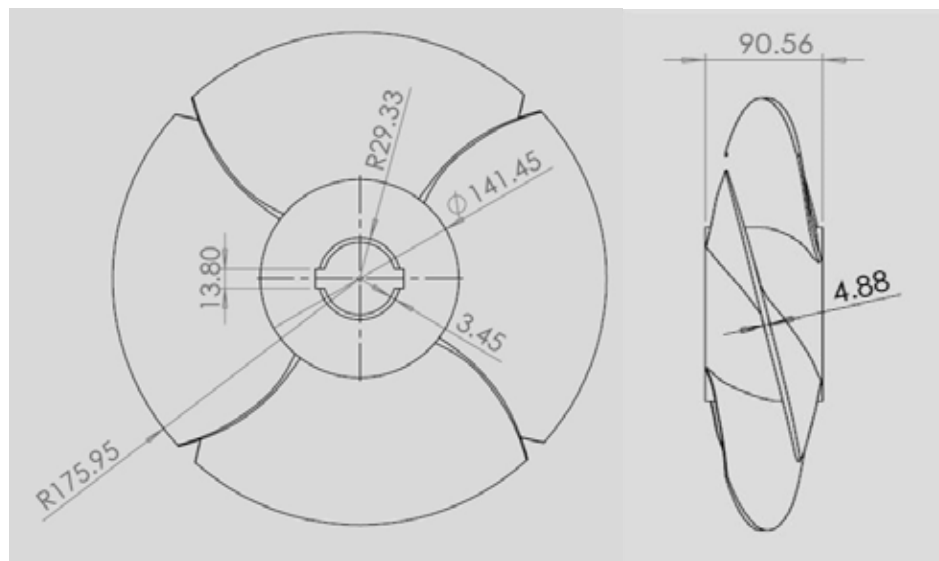


Figura 11. Plano del rotor de la bomba axial. Vista frontal y Vista lateral

Fuente: Piña, Rufa (2017)

Tabla 2 Condiciones de operación del estator.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

Caudal	978,481m ³ /h
Presión absoluta de entrada	203.71 KPA

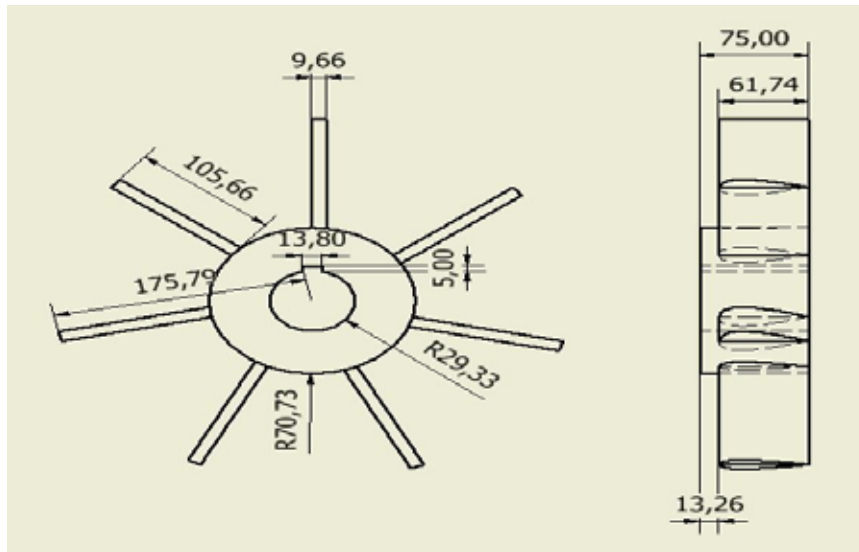


Figura 12. Plano del estator de la bomba axial. Vista frontal y Vista lateral
Fuente: Piña, Rufa (2017)

Fase II. Diseñar el modelo de la máquina a simular mediante una herramienta CAD.

Mediante la utilización de una herramienta CAD, se realizará el diseño del rotor-alabes guías de la bomba seleccionada, tomando en cuenta los parámetros geométricos de la bomba seleccionada. A fines prácticos del diseño, el rotor y los alabes guías se diseñan por separado y luego se realiza un ensamble de ambos, dando lugar al conjunto.

La geometría para el rotor-estator (alabes guías) de la bomba axial seleccionada, se obtuvo a partir del uso de una herramienta de diseño asistido por computadora (Inventor 2016). Se toma como características fundamentales el diámetro interno y externo del rotor y del estator, dimensiones de los álabes que incluyen espesor y ángulos a la entrada y a la salida del flujo (Ver figura 13 y 14).

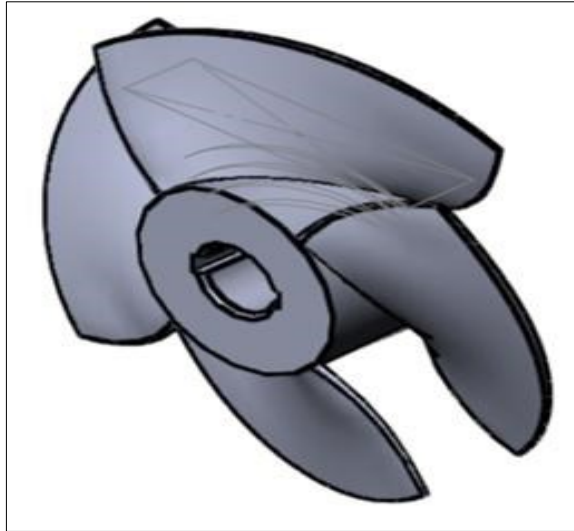


Figura 13. Diseño realizado por inventor del rotor de la bomba axial.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

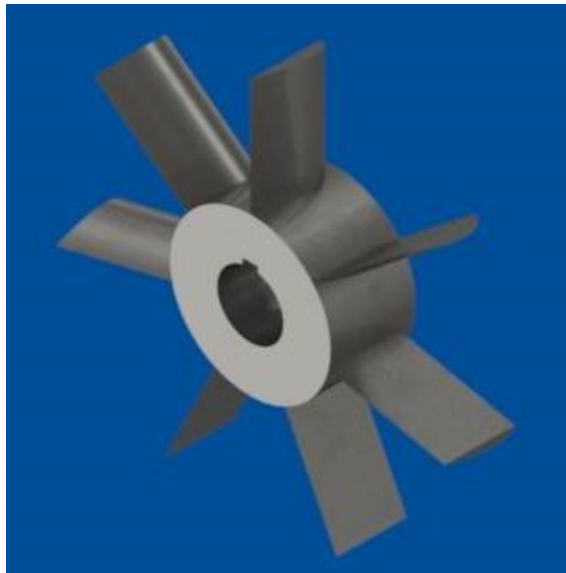


Figura 14. Diseño realizado por inventor del estator de la bomba axial.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

Fase III. Discretizar el dominio y fijar las condiciones de frontera del campo de flujo según la geometría.

Una vez obtenidas las geometrías del rotor y del estator por medio de la herramienta CAD, se realiza la exportación del archivo a la herramienta CFD, luego

se procede a generar el dominio fluidizado, el cual se define como los espacios por donde pasa el fluido que no es sólido. La generación de este dominio se logró a través de una operación denominada boolean, que permitió extraer la superficie abarcada por la geometría del rotor dentro del cilindro que representa al fluido, dando lugar al dominio fluidizado, el cual se aprecia en la figura 15. El mismo procedimiento aplica para la generación del dominio fluidizado del estator.

Finalmente se debe aplicar el mallado apropiado para cada región del dominio, con el fin de obtener los resultados más aproximados a la realidad con el modelo matemático.

• **Dominio fluidizado y generado de mallado del rotor.**

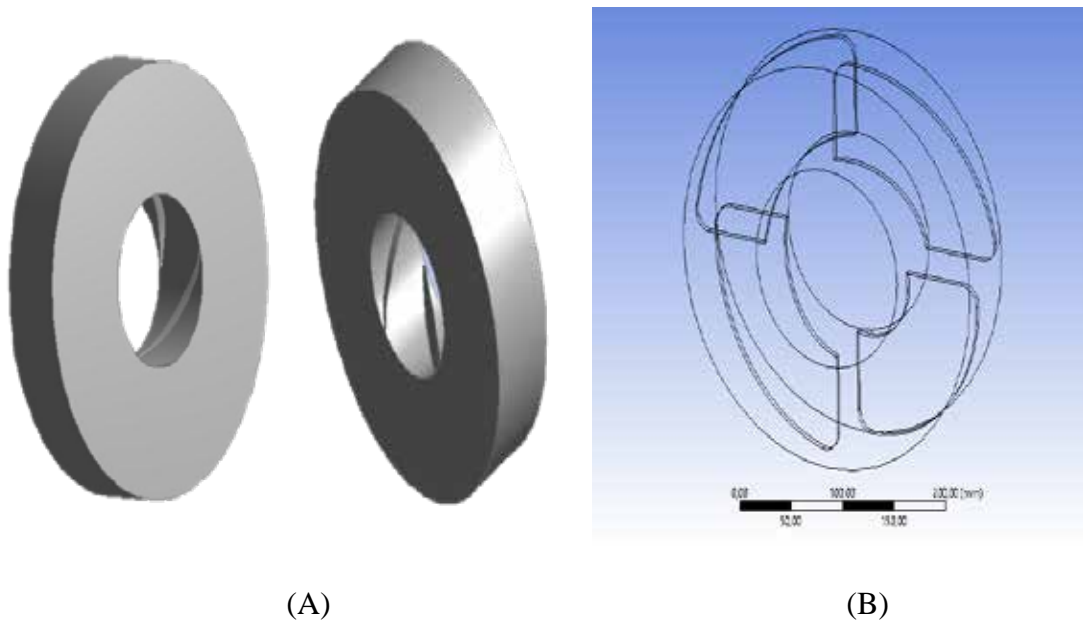


Figura 15. Dominio fluidizado del rotor. (A) Vista lateral derecha, Vista lateral izquierda. (B) Vista interna del dominio fluidizado.

Fuente: Piña, Rufa (2017)



Figura 16. Detalle del dominio fluidizado en la zona de los alabes del rotor.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

Ya teniendo el dominio fluidizado del rotor se procede a generar la malla, la cual tendrá el número de elementos por defecto que arroje el programa, al igual que el tamaño de los mismos, como se aprecia en las figuras 17, 18 y 19.

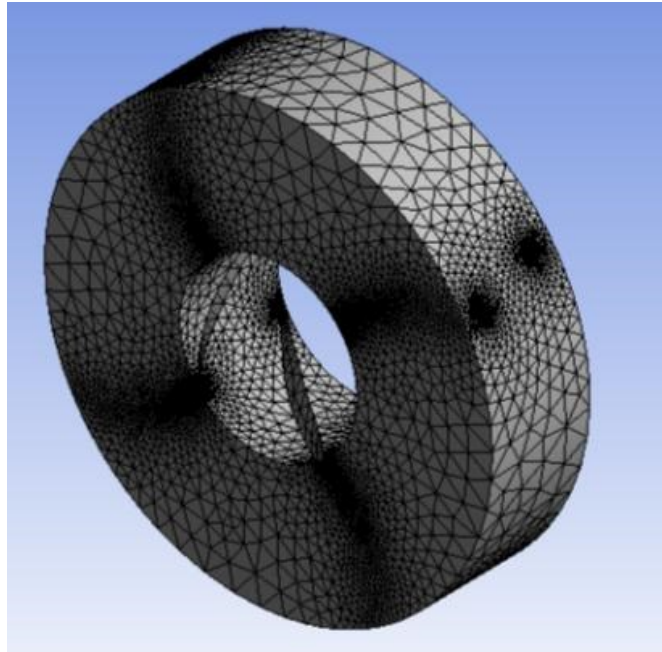
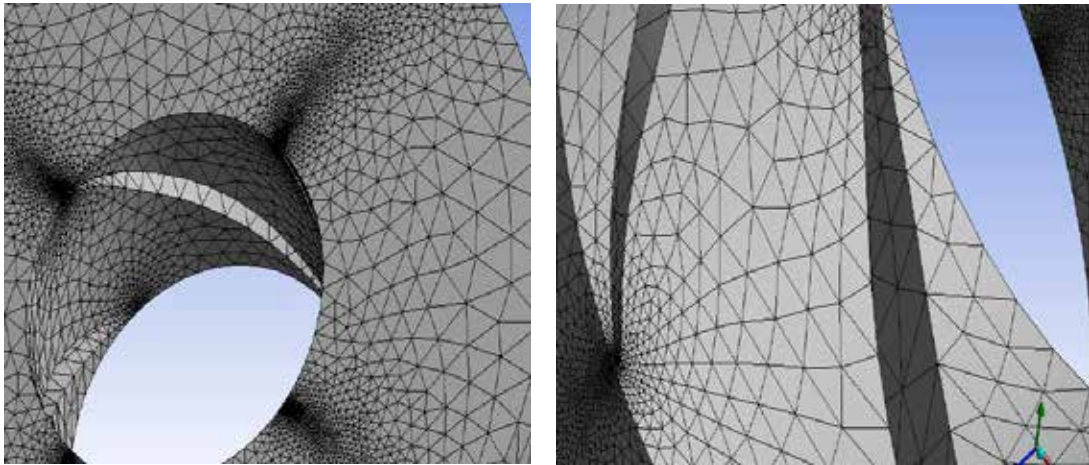


Figura 17. Mallado del dominio fluidizado en el rotor.

Fuente: Piña, Rufa (2017)



(a)

(b)

Figura 18. Detalles del mallado del dominio fluidizado en el rotor. (a) Vista semi superior del mallado. (b) Acercamiento a la zona interna del mallado.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

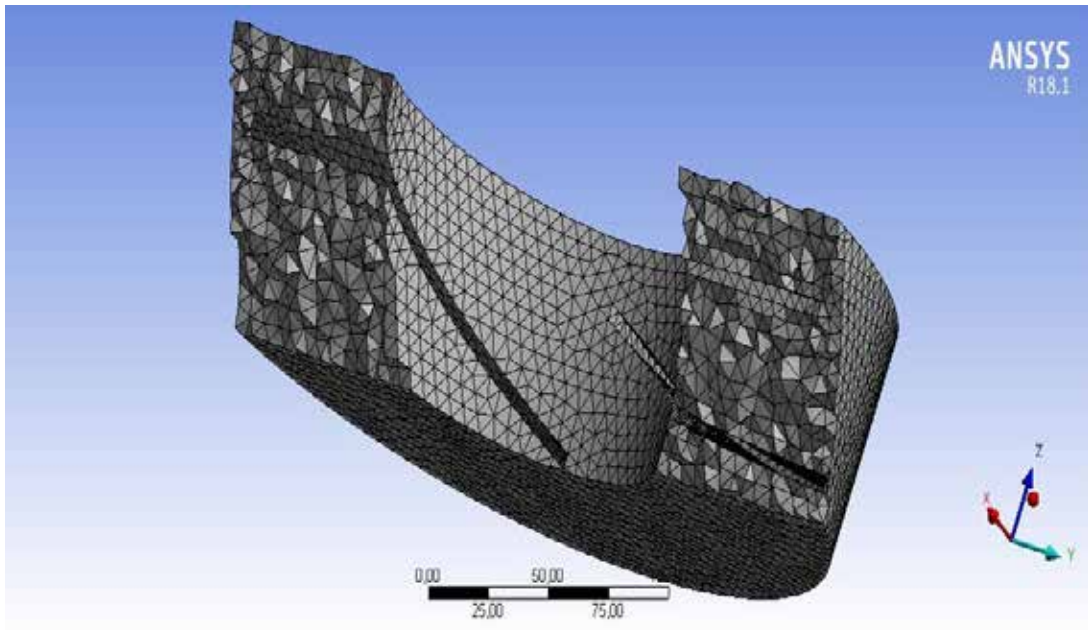


Figura 19. Detalles del mallado tetraédrico del dominio fluidizado en el rotor.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

- **Dominio fluidizado y generado de mallado del estator.**

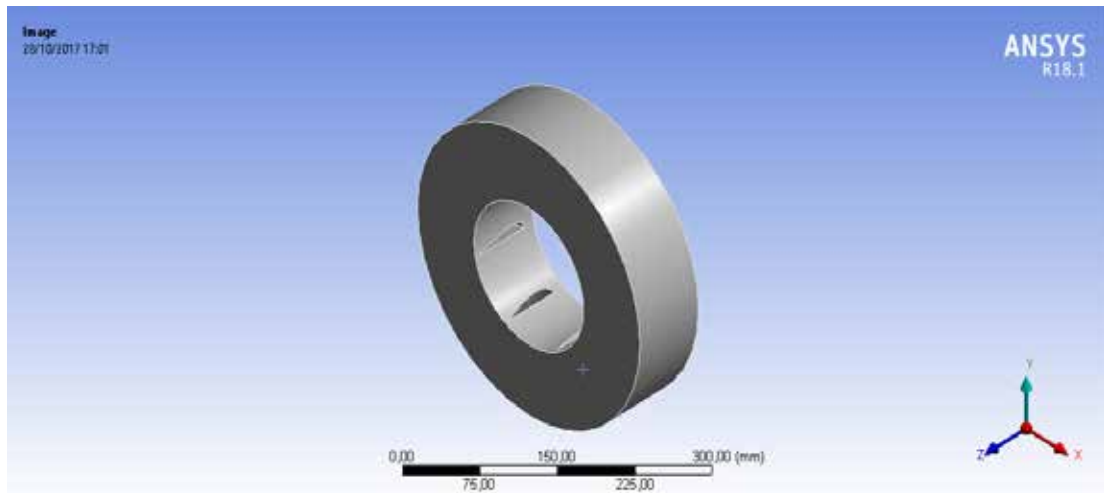


Figura 20. Dominio fluidizado del estator.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

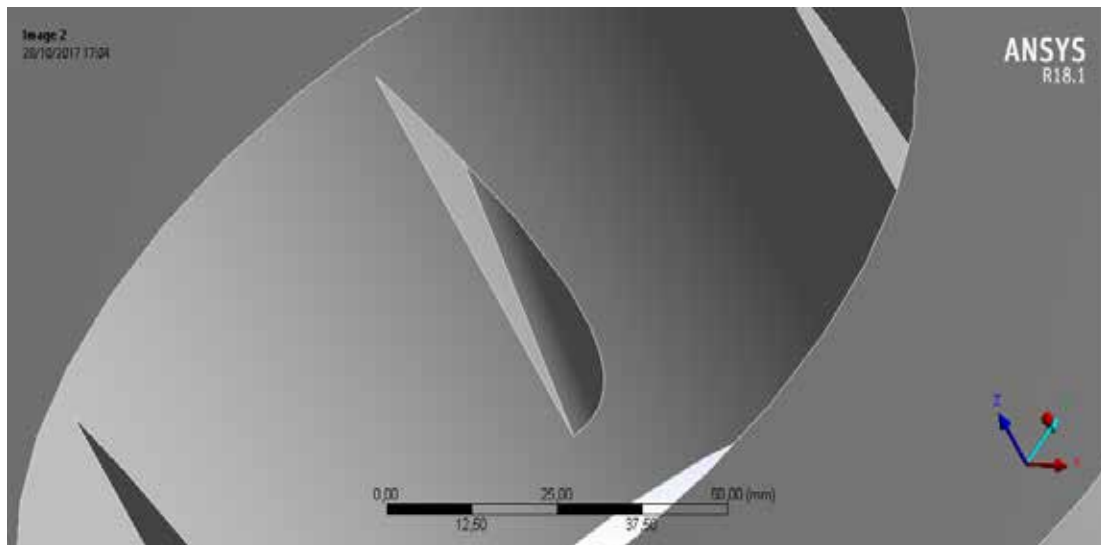


Figura 21. Detalle del dominio fluidizado en la zona de los alabes del estator

Fuente: Piña, Rufa (2017)

Ya teniendo el dominio fluidizado del estator se procede a generar la malla, en este caso se generó un mallado más fino para tener una buena malla y no tener problemas en la simulación con el fluido en la entrada y salida del estator o alabes guías (Ver figuras de la 22 a la 28).

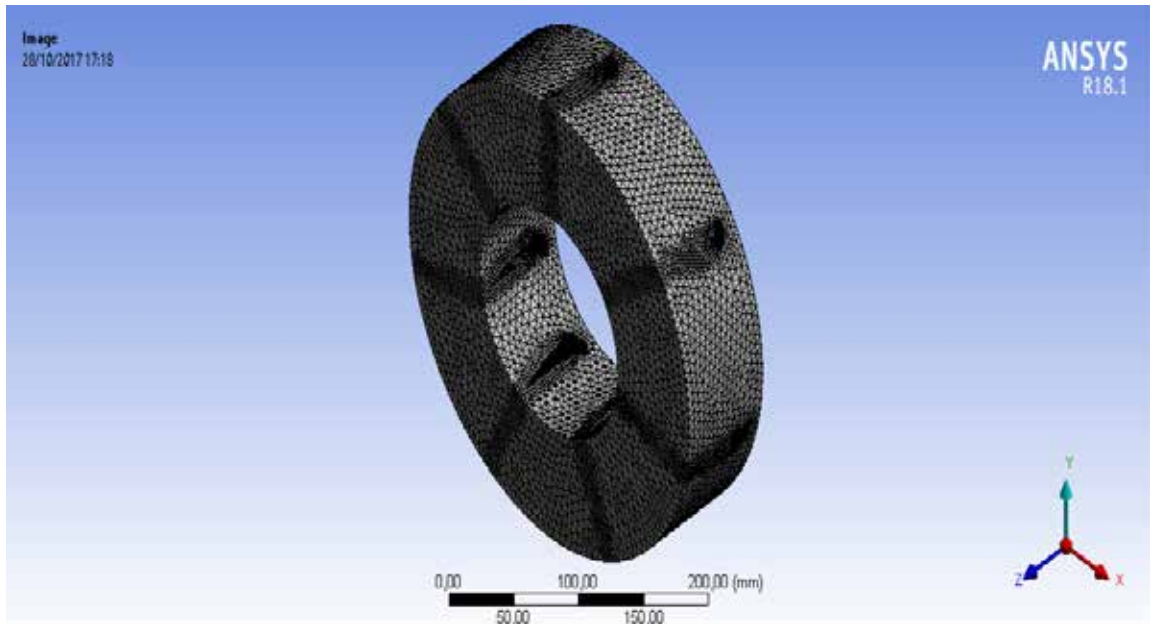


Figura 22. Mallado del dominio fluidizado en el estator.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

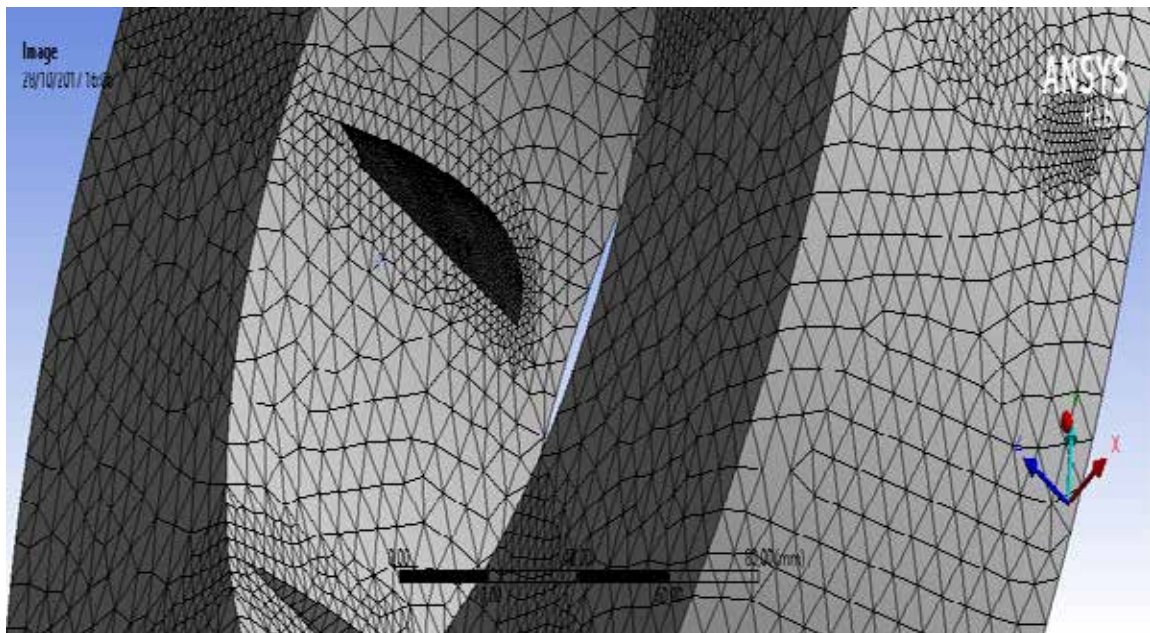


Figura 23. Detalle del mallado del dominio fluidizado en el estator.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

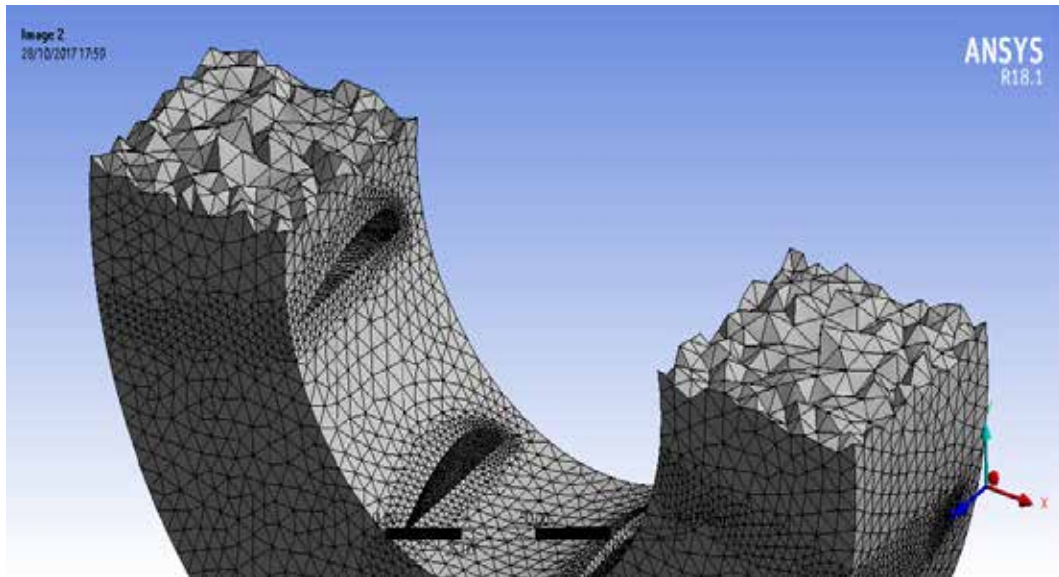


Figura 24. Detalles del mallado tetraédricos del dominio fluidizado en el estator.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

Dominio fluidizado y generado de mallado del conjunto rotor-estator.

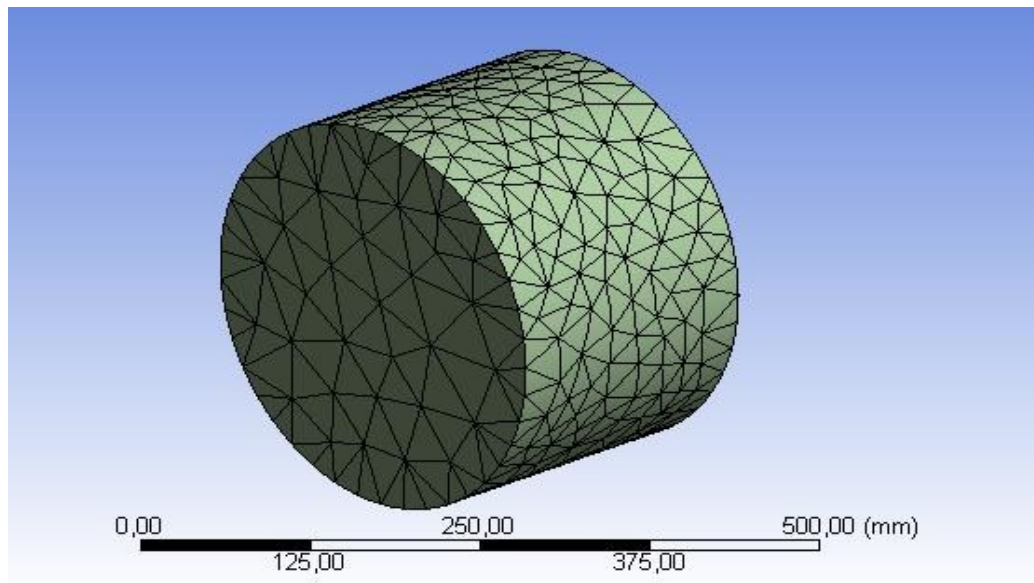


Figura 25. Dominio fluidizado y generado de mallado del conjunto rotor-estator.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

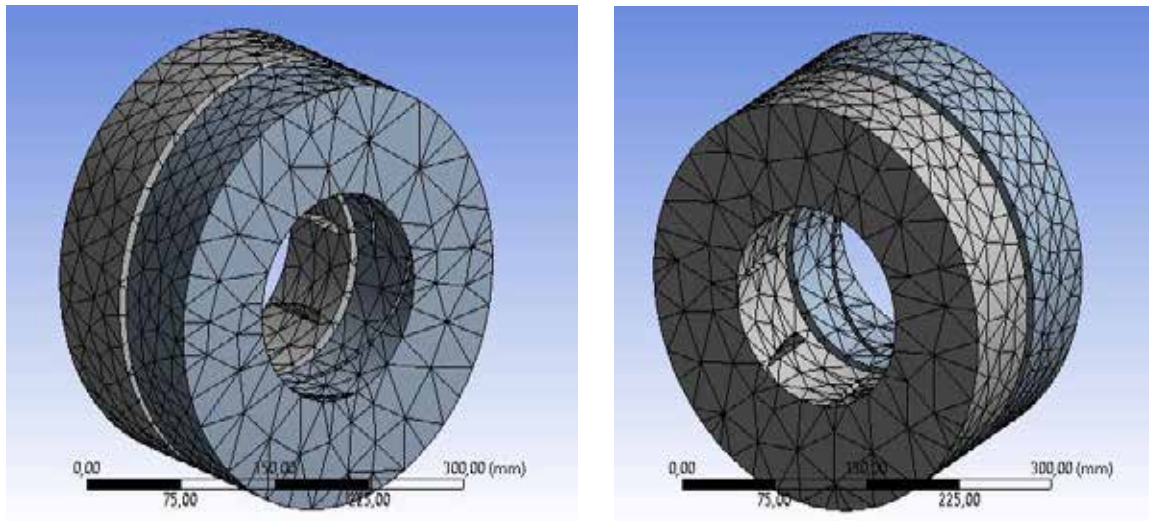


Figura 26. Dominio fluidizado y generado de mallado del conjunto rotor-estator.
Vista lateral derecha. Vista lateral izquierda.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

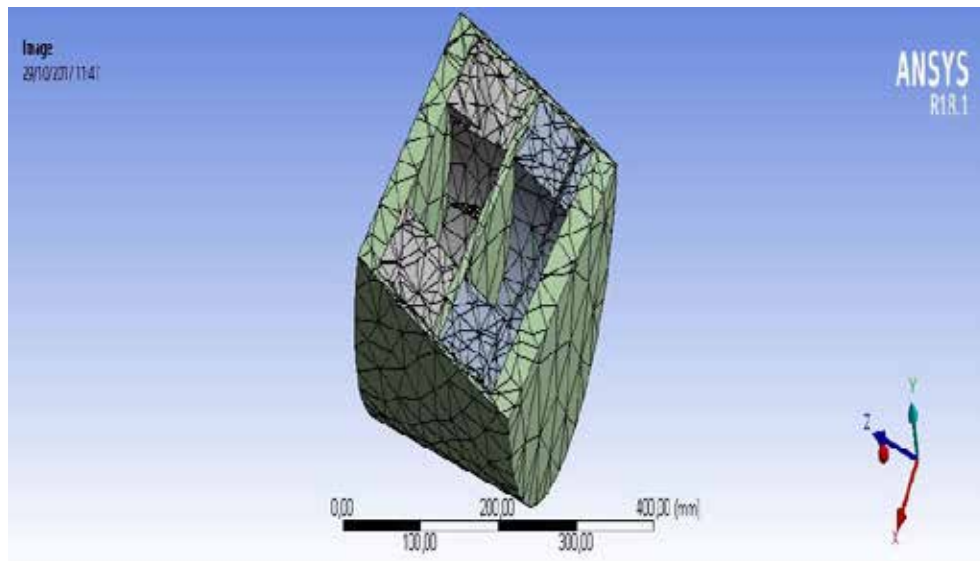


Figura 27. Generación del dominio fluidizado y generado de mallado través de la operación denominada boolean.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

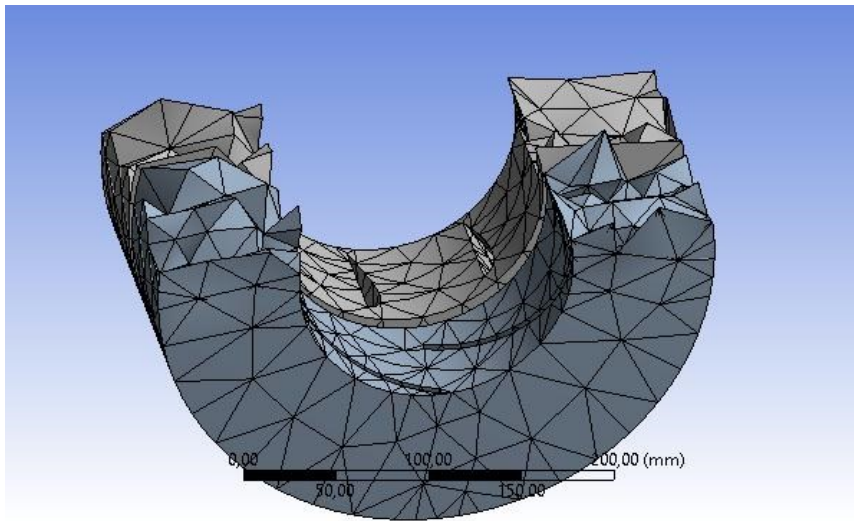


Figura 28. Detalles del mallado tetraédricos del dominio fluidizado del conjunto rotor-estator.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

· **Configuración del dominio y condiciones de borde del rotor**

En este paso se definen las condiciones de trabajo del equipo, superficie de entrada y la superficie de salida del flujo que pasa a través del rotor, además de la superficie interna del mismo. También se toma en cuenta la temperatura del fluido y se elige el modelo de turbulencia a estudiar cómo se puede ver en la figura 29.

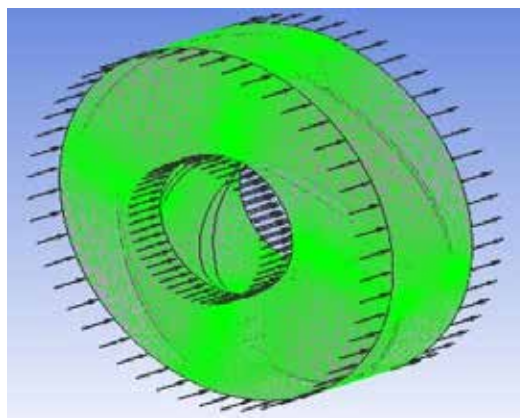


Figura 29. Interfaz del ANSYS. Introducción del mallado en CFX Pre.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

En el dominio por defecto, en CFX Pre, se establecen todas las características de las zonas definidas del fluido. En este caso se trabaja con agua a una temperatura de 20°C, se definen otras de sus propiedades como lo son la viscosidad cinemática y la densidad y una presión de referencia igual a la atmosférica (100 KPa). Debido a que el dominio corresponde a una turbomáquina axial se establece una velocidad de giro con respecto al eje axial de la máquina.



Figura 30. Configuraciones básicas del dominio fluidizado
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)



Figura 31. Configuración del modelo de fluido y modelo de turbulencia.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

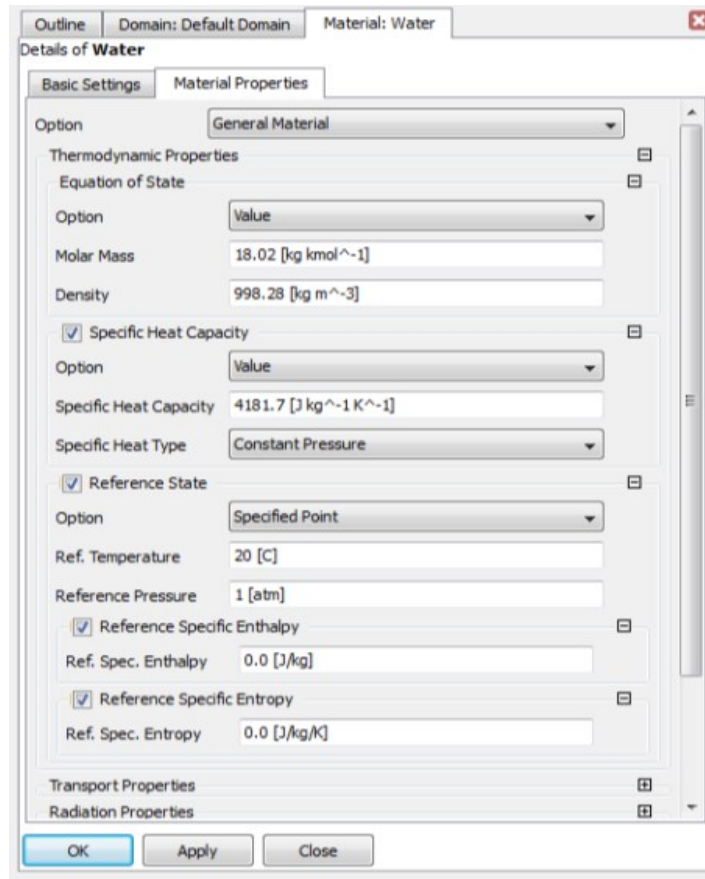
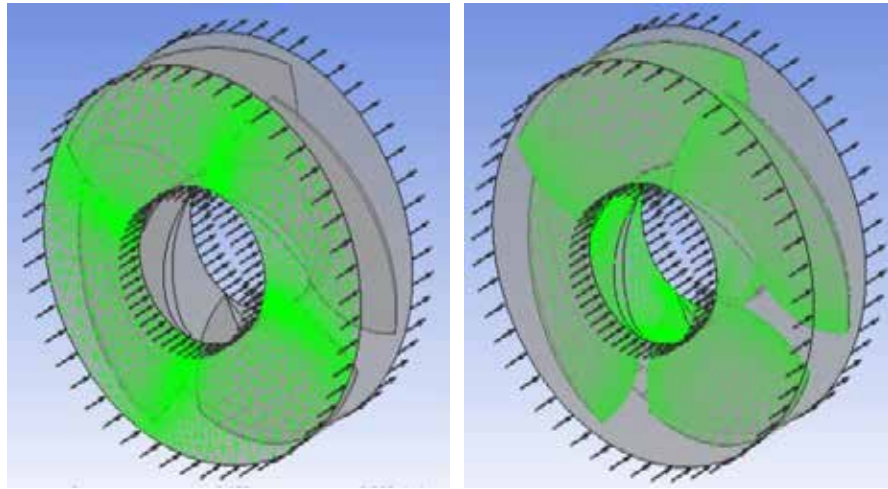


Figura 32. Propiedades del fluido de trabajo (agua).

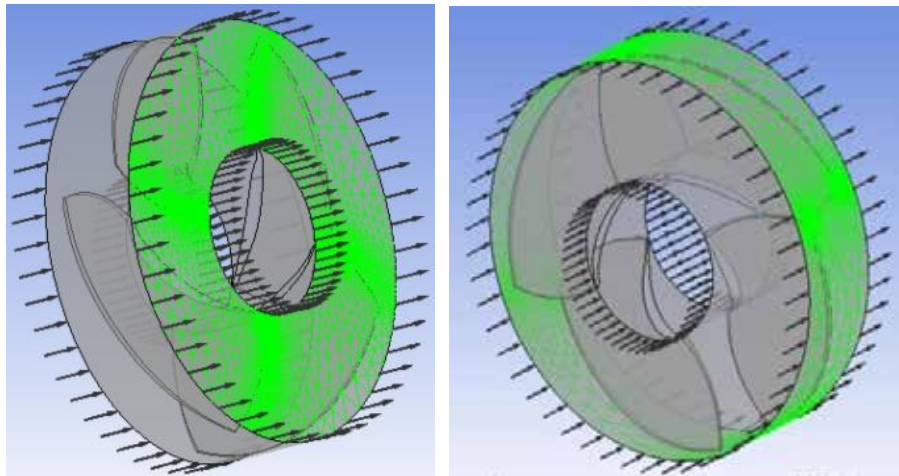
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

Se deben asignar propiedades a las regiones definidas en el mallado, las cuales son: inlet (entrada), wall (pared), outlet (salida) y moving (móvil). La entrada se define como estacionaria, ya que, en referencia al resto del fluido, esta no presenta una velocidad, la figura N^a 29 ilustra las configuraciones en la pestaña de detalles de borde, en la cual se asignan valores en masa y momento, estableciendo una presión relativa de 100 KPa y asignando la dirección del flujo, la cual es normal a la condición de borde. Caso similar se aplica a la salida, estableciendo un régimen de flujo subsónico y un flujo másico de 271,3329 Kg/s (Figura d). La región de pared se configura como una pared sin deslizamiento, de superficie suave y en contra rotación al giro del impulsor (Figura b).



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3. Condiciones de frontera. (a) inlet (entrada). (b) moving (móvil). (c) outlet (salida). (d) wall (pared).

Fuente: Piña, Rufa (2017)



Figura 34. Detalles de la configuración de la entrada (inlet).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

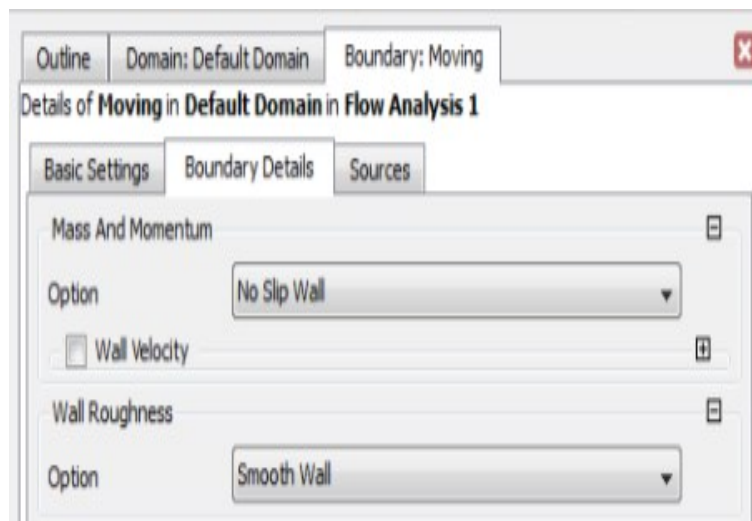


Figura 35. Detalles de la configuración de la parte móvil (moving).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

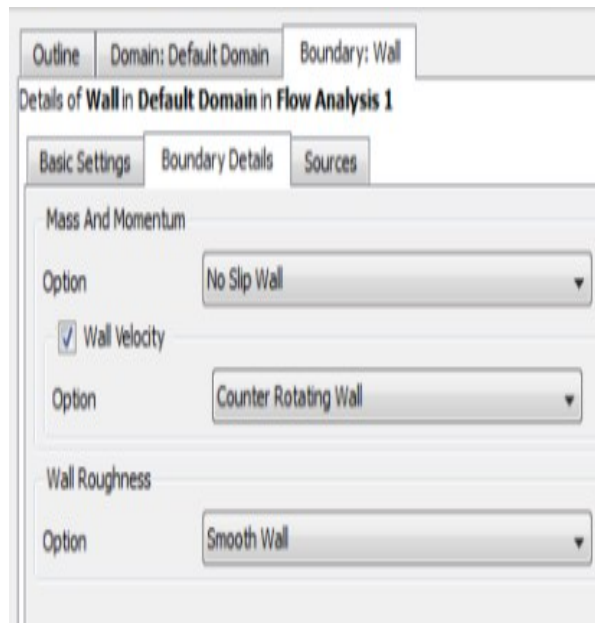


Figura 36. Detalles de la configuración de pared (wall).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

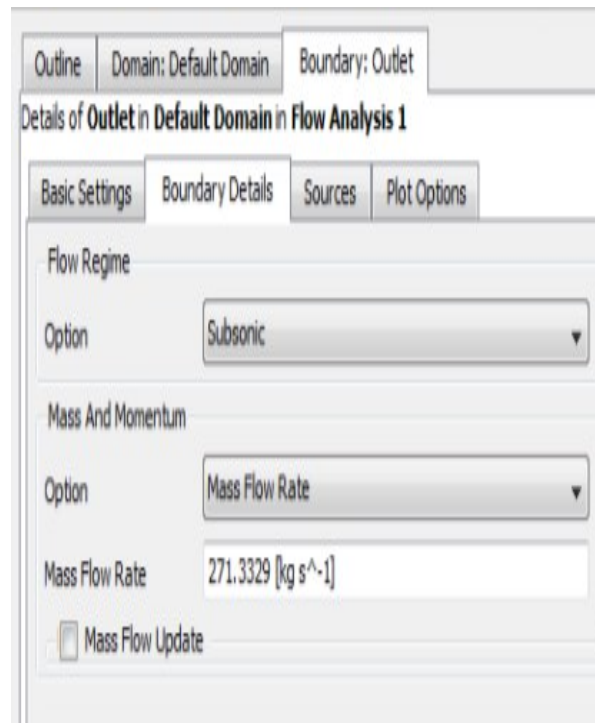


Figura 37. Detalles de la configuración de salida (outlet).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

Posteriormente se configura el solver control, en la pestaña de configuraciones básicas (Figura 38) en el cual se establecen los criterios para la convergencia de la simulación para el rotor, tales como el valor residual RMS, el rango de iteraciones, entre otras.

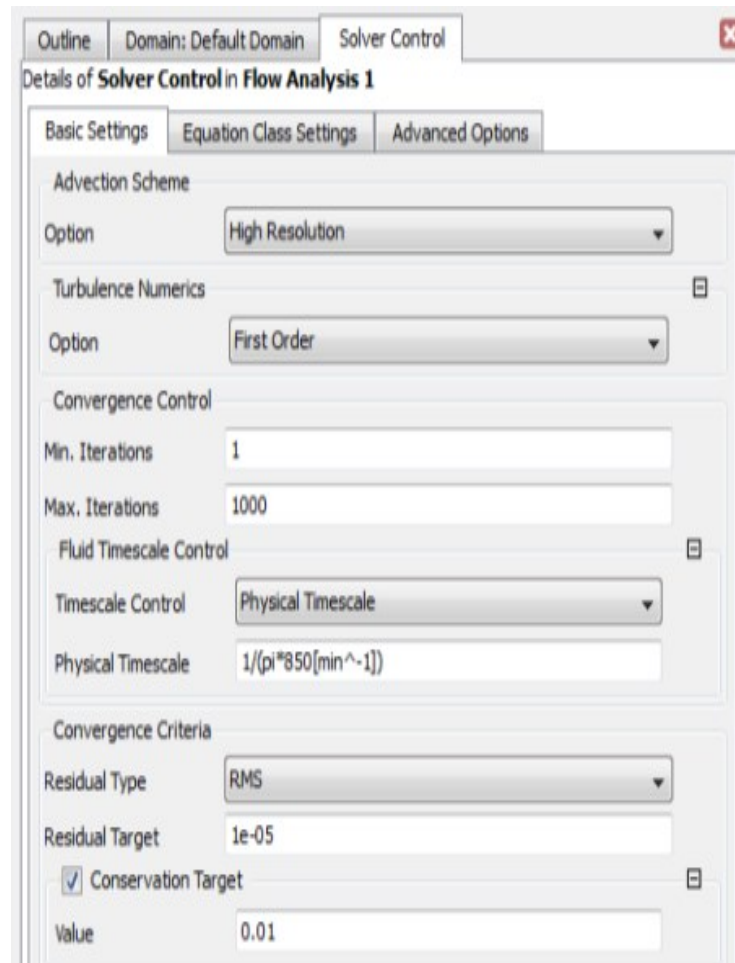


Figura 38. Configuración de Solver Control

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

· **Dominio y condiciones de borde del estator.**

En este paso se definen las condiciones de trabajo del equipo, superficie de entrada y la superficie de salida del flujo que pasa a través del estator, además de la

superficie interna del mismo. También se toma en cuenta la temperatura del fluido y se elige el modelo de turbulencia a estudiar.

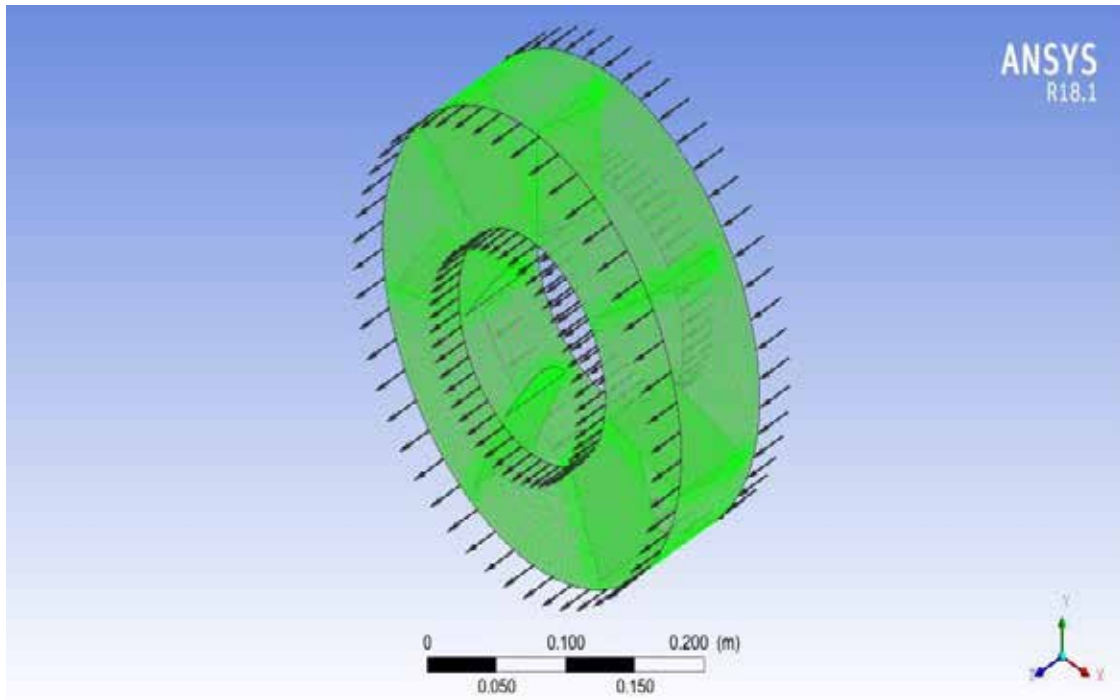


Figura 39. Interfaz del ANSYS. Introducción del mallado en CFX Pre.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

En el dominio por defecto, en CFX Pre, se establecen todas las características de las zonas definidas del fluido. En este caso se trabaja con agua a una temperatura de 20°C, se definen otras de sus propiedades como lo son la viscosidad cinemática y la densidad y una presión de referencia igual a la atmosférica (100 KPa). Debido a que el dominio corresponde a una turbomáquina axial se establece una velocidad de giro con respecto al eje axial de la máquina.

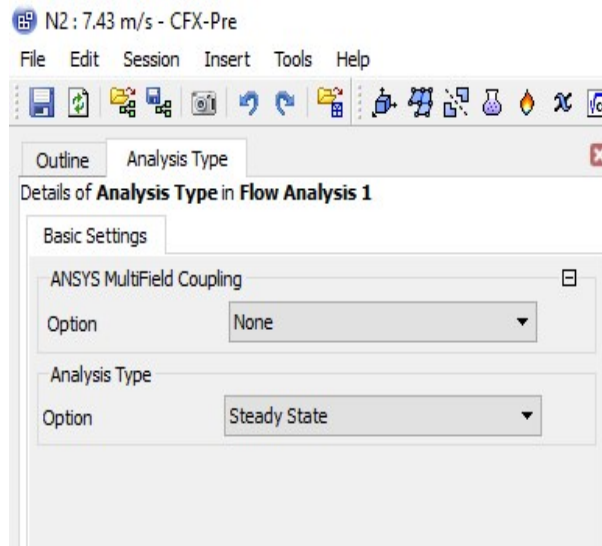


Figura 40. Tipo de análisis.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

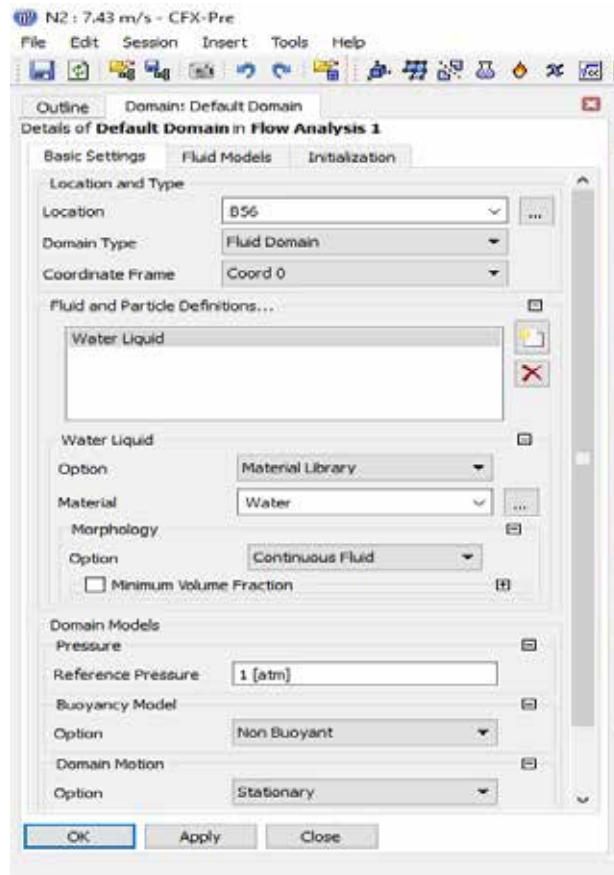


Figura 41. Configuraciones básicas del dominio fluidizado.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

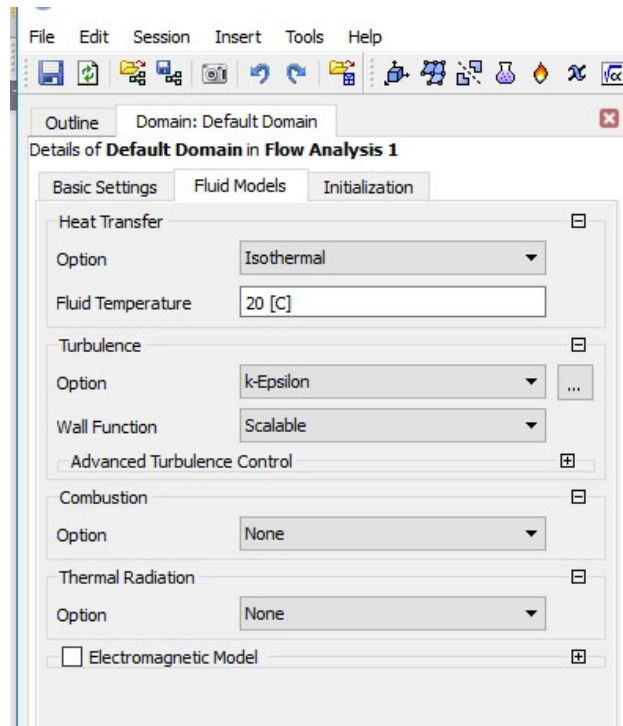


Figura 42. Configuración del modelo de fluido y modelo de turbulencia.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

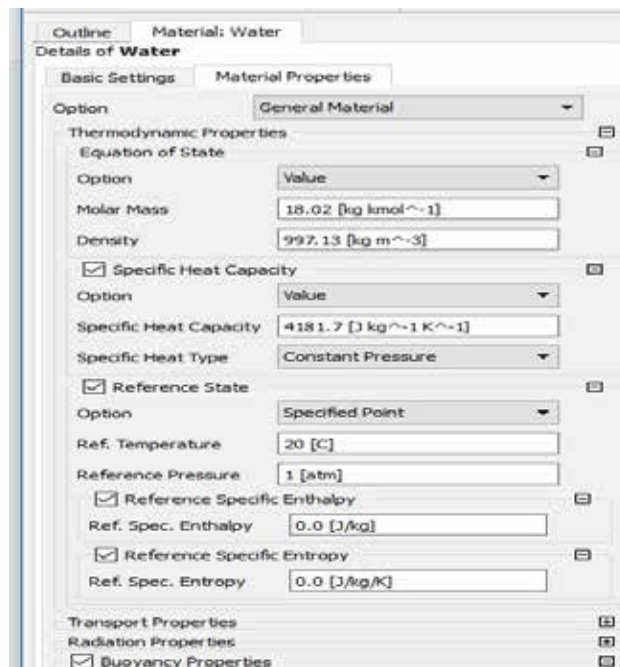
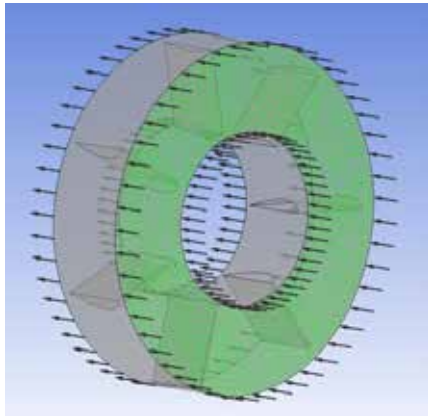
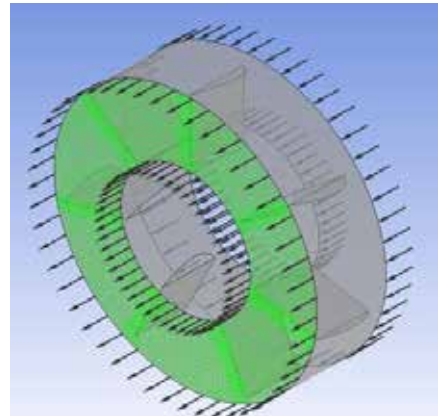


Figura 43. Propiedades del fluido de trabajo (agua).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

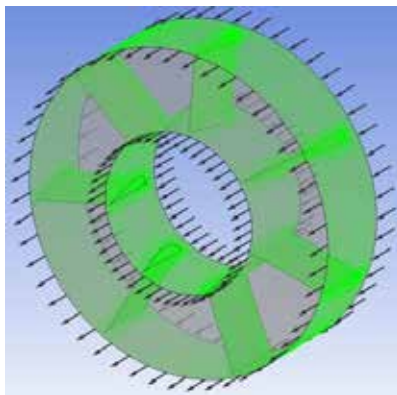
Se deben asignar propiedades a las regiones definidas en el mallado, las cuales son: inlet (entrada), wall (pared), outlet (salida). La entrada (figura a) se define como estacionaria, la figura 45 ilustra las configuraciones en la pestaña de detalles de borde, en la cual se asignan valores en masa y momento, estableciendo una velocidad normal de 7,43 m/s y asignando la dirección del flujo, la cual es normal a la condición de borde. Caso similar se aplica a la salida (figura b), estableciendo un régimen de flujo subsónico y una presión relativa de 10000 Pa. En caso de la región de pared se configura también como una pared los alabes guías o estator para que se pueda ver la función y resultados de los alabes guías en la simulación (Figura c).



(A)



(B)



(C)

Figura 44. Condiciones de frontera. (A) inlet (entrada). (B) Outlet (salida). (C) Wall (pared).

Fuente: Piña, Rufa (2017)

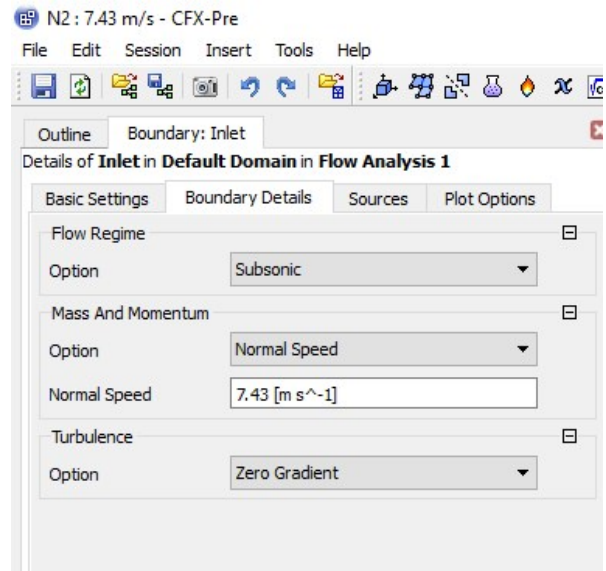
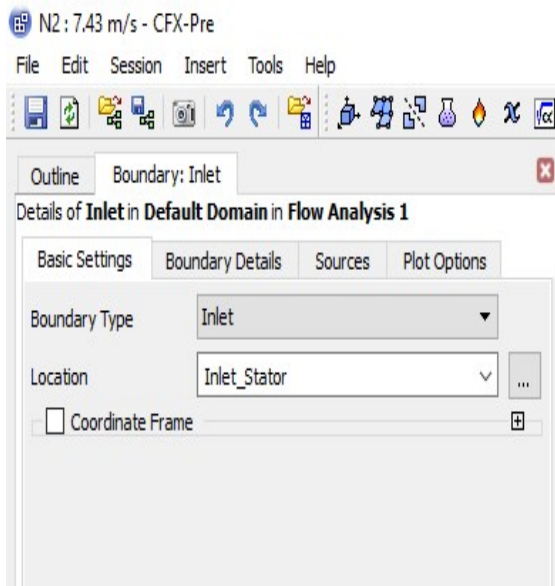


Figura 45. Detalles de la configuración de la entrada (inlet).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

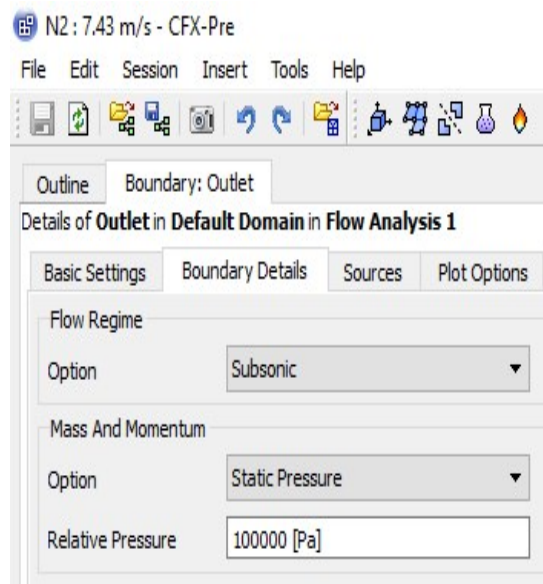
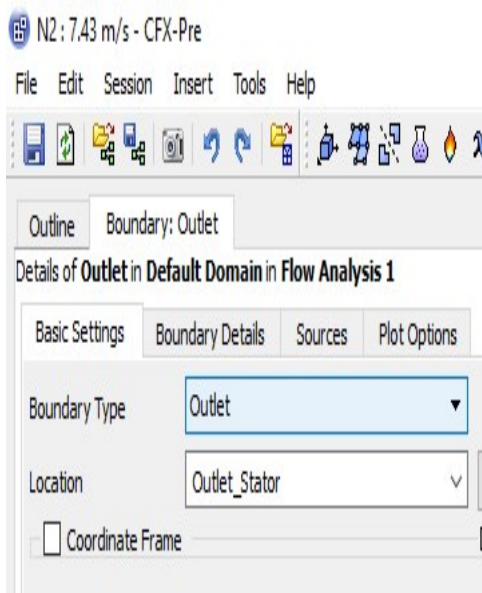


Figura 46. Detalles de la configuración de salida (outlet).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

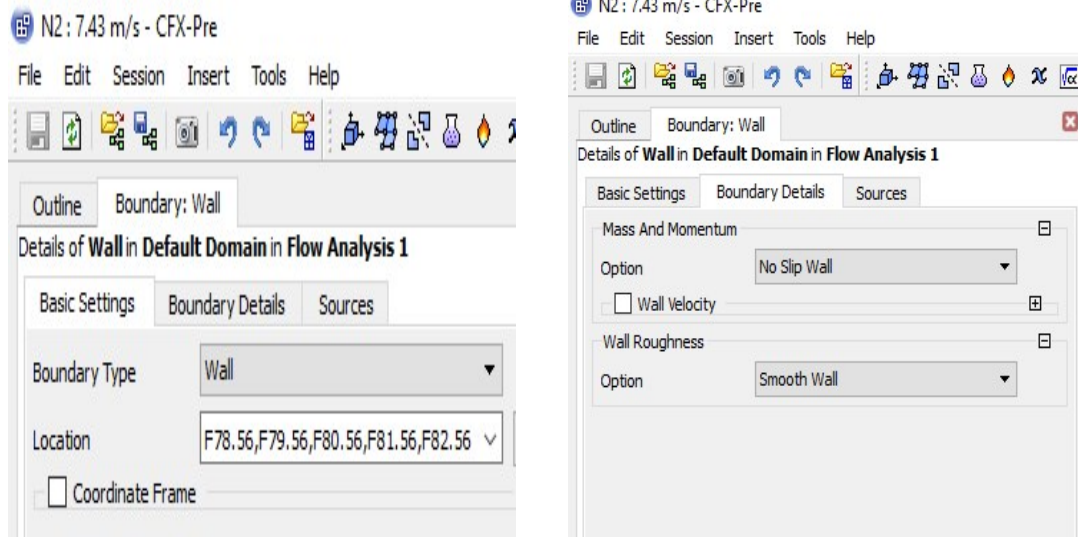


Figura 47. Detalles de la configuración de pared (wall).
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

Posteriormente se configura el solver control, en la pestaña de configuraciones básicas (Figura 48) en el cual se establecen los criterios para la convergencia de la simulación para el estator, tales como el valor residual RMS, el rango de iteraciones, entre otras.

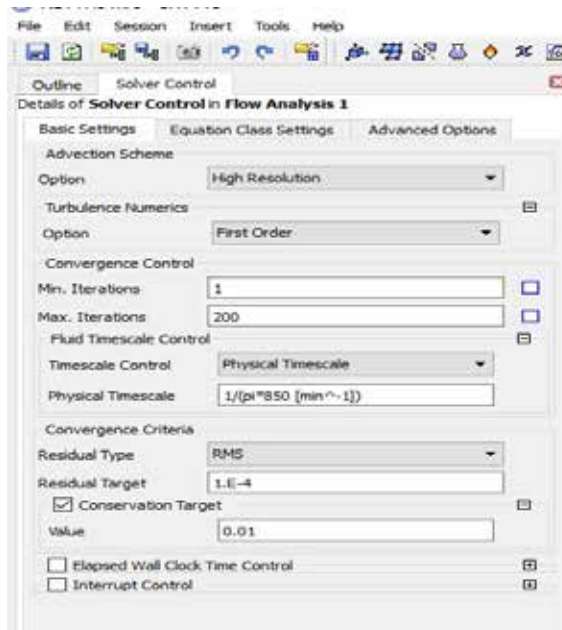


Figura 48. Configuración de Solver Control.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

- **Dominio, condiciones de borde y Convergencia de la simulación para el conjunto rotor-estator.**

Una vez defina todas las características y las condiciones de trabajo del equipo, superficie de entrada y la superficie de salida del flujo que pasa a través del conjunto rotor-estator además de la superficie interna del mismo. Posteriormente se configura el solver control, en el cual se establecen los criterios para la convergencia de la simulación para el rotor-estator. Las simulaciones del conjunto rotor-estator se configuraron con un número máximo de 1000 iteraciones y con un criterio de convergencia de un valor residual RMS de 1×10^{-5} , definiendo la duración máxima de la simulación ya que este posee movimientos al entrar al rotor y luego pasa por un estator causando esto una máxima exigencia para la simulación.

Finalmente no se pudo realizar la simulación para el conjunto rotor-estator ya de esta requiere de mucho más tiempo para poder ser simulada debido al tamaño del conjunto la cual genero un mallado fino y con una gran cantidad de nodos causando una gran exigencia para poder realizar la simulación dentro del tiempo establecido en el cronograma de actividades se igual forma se necesita también de un computador mucho más potente para poder realizar dicha simulación y así cumpla con las exigencias del software. Sin embargo, se optó por realizar las simulaciones por separado del rotor y del estator siendo estas simulaciones que no requieren de mucho tiempo y así analizar los resultados de cada componente a través de gráficos, animaciones, tablas y relacionarlos entre ellos comparando resultados tanto de entrada y salida del rotor con la entrada y salida del estator cumpliendo con todos los objetivos establecidos

Fase IV. Realizar la simulación del flujo a través del impulsor de una bomba axial y obtener los resultados en forma de gráficas y/o tablas de las variables descriptivas del fenómeno.

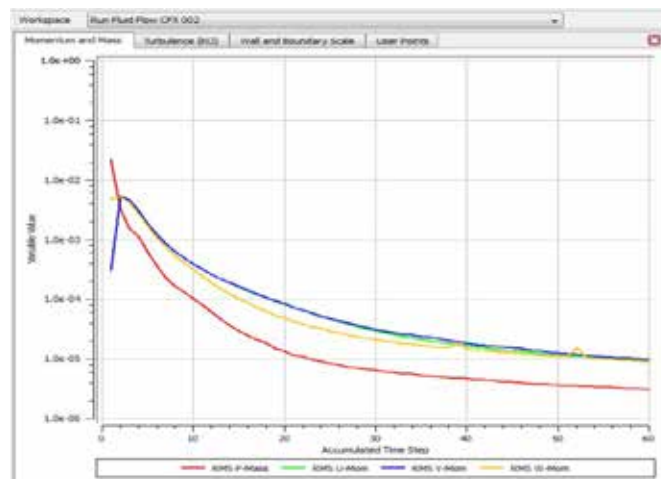
Considerando las condiciones de frontera y el mallado establecido previamente, se procederá a realizar la simulación en la herramienta CFD seleccionada. Se realizará la configuración del solver de dinámica de fluidos computacional en base al

modelo matemático que aplica al dominio fluidizado en estudio, lo cual nos arrojará los resultados pertinentes que luego serán tabulados y/o graficados.

· **Convergencia de la simulación en el rotor.**

A través de un procesador de ecuaciones se iteran las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, conservación de volumen y la ecuación del modelo de turbulencia, de manera de cumplir con el criterio de convergencia establecido. Se define por convergencia como la propiedad de dos o más cosas que confluyen en un mismo punto. Dado que el valor preestablecido en el solver control de RMS para el rotor es de 1×10^{-5} ya de que es giratorio y se consideró que necesita más iteraciones, a diferencia que para el estator como es fijo se consideró que no necesita tantas iteraciones por esa razón el valor preestablecido en el solver control de RMS es de 1×10^{-4} . La simulación llegará a la convergencia cuando las ecuaciones mencionadas anteriormente lleguen a dicho valor preestablecido, tal como lo muestran a continuación.

En la gráfica 1 podemos observar la gráfica generada por el solver de resolución de ecuaciones el cual muestra la convergencia de la simulación, y como la simulación se detiene al momento de alcanzar el criterio establecido, logrando un valor residual en las ecuaciones de balance de masa (P-Mass) y para la conservación de momento (U-Mon, V-Mon y W-Mon) menor a 1×10^{-5} .

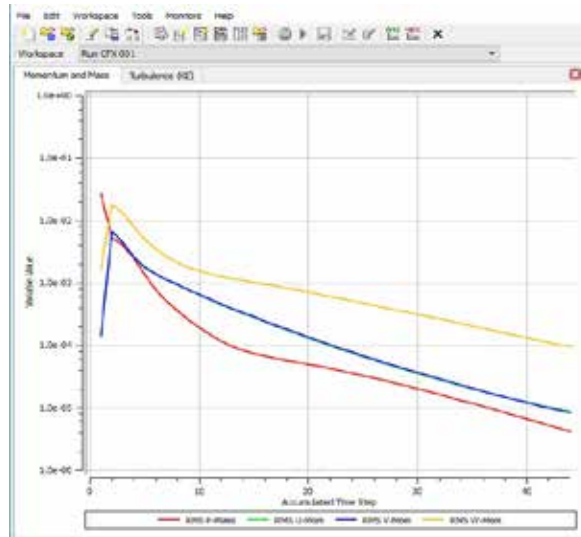


Gráfica 1. Convergencia de una simulación en el rotor, las ecuaciones de gobierno llegan al valor de 1×10^{-5} .

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

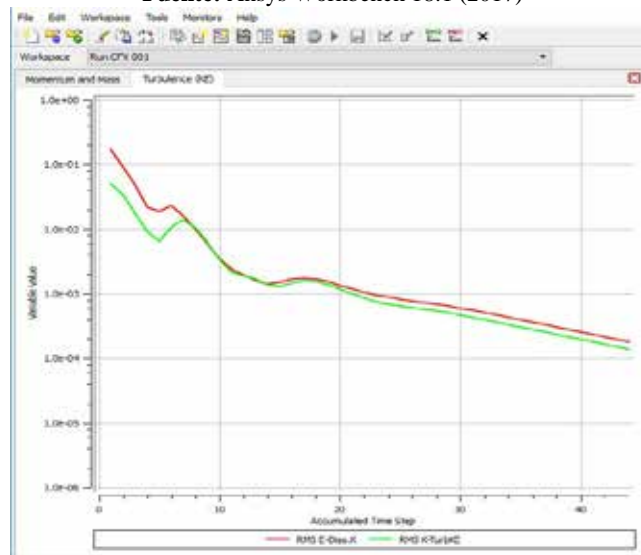
- **Convergencia de la simulación en el estator.**

Detallando la convergencia de la simulación, se observa como la simulación se detiene al momento de alcanzar el criterio establecido, logrando un valor residual en las ecuaciones de balance de masa (P-Mass) y para la conservación de momento (U-Mon, V-Mon y W-Mon) menor a 1×10^{-4} .



Gráfica 2. Convergencia de la simulación en el estator, las ecuaciones de gobierno llegan al valor de 1×10^{-4}

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)



Gráfica 3. Turbulencia de la simulación en el estator, las ecuaciones de gobierno llegan al valor de 1×10^{-4}

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

Fase V. Validar los resultados comparándolos con los obtenidos por ensayos experimentales realizados anteriormente y/o formular las hipótesis en base a los principios de conservación.

Los resultados obtenidos después de la simulación proceden a ser comparados con los resultados de otros ensayos seleccionados, a fin de determinar las diferencias, validar nuestra investigación o de ser necesario, proponer nuevos hallazgos en forma de hipótesis (Capítulo IV).

Los resultados se validaran comparando la curva característica (H Vs Q) obtenida mediante la simulación a través de la herramienta computacional (CFD), con la curva experimental de un modelo comercial de una bomba axial.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los análisis de los resultados obtenidos durante el estudio y simulación del flujo incompresible a través del rotor-álabes guías de una bomba de flujo axial. Considerando el modelo matemático utilizado, el diseño de la maquina a simular y las condiciones establecidas para la convergencia de las simulaciones realizadas y finalmente se expresa el análisis de los resultados obtenidos durante la investigación, acompañado de gráficos, tablas e imágenes que permitan una mayor comprensión. De igual manera se validaran los resultados comparando la curva característica (H Vs Q) obtenida con la curva experimental de un modelo comercial de una bomba axial.

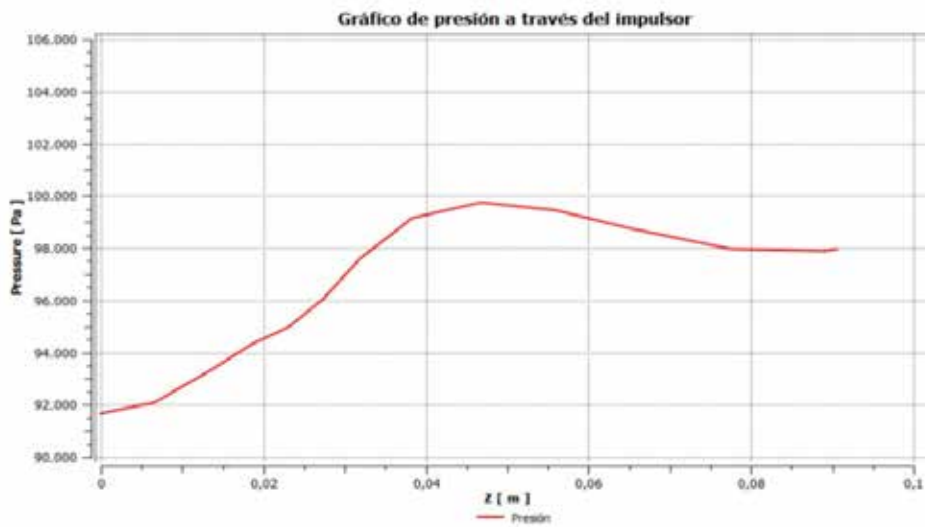
4.1.1 Organización y clasificación de los resultados obtenidos en la simulación en forma de gráficas y/o tablas de las variables descriptivas del fenómeno.

· Resultados del rotor obtenidos en la simulación.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del rotor en las simulaciones realizadas, variando la velocidad de giro del rotor y observando la variación de presión que ocurre desde la entrada hasta la salida del mismo, así como también la variación de la velocidad relativa.

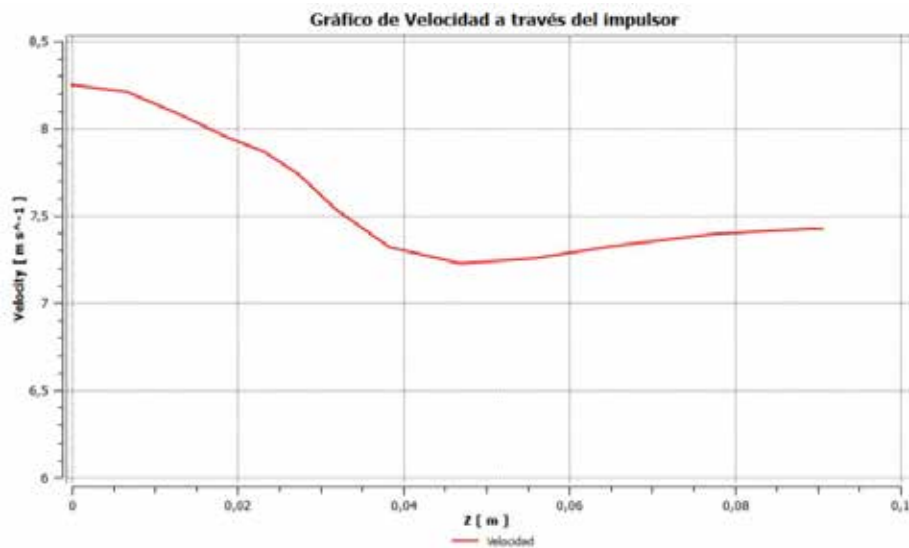
Las simulaciones del rotor se configuraron con un número máximo de 1000 iteraciones y con un criterio de convergencia de un valor residual RMS de 1×10^{-5} , definiendo la duración máxima de la simulación ya que este posee movimientos a diferentes rpm y esto hace mucho más exigente la simulación.

Resultados del rotor girando a 850 rpm.



Gráfica 4. Gráfica de variación de presión del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.

Fuente: Piña, Rufa (2017)



Gráfica 5. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

La figura 49 y 50 muestran un plano ilustrativo del aumento de presión del flujo a través del rotor girando a 850 rpm, dicho aumento se debe a la energía transmitida por el giro del rodete, sin embargo se observa una disminución de la presión desde el momento en que el flujo impacta con el alabe hasta un cierto punto en el seno del mismo, donde posteriormente comienza el incremento de presión deseado.

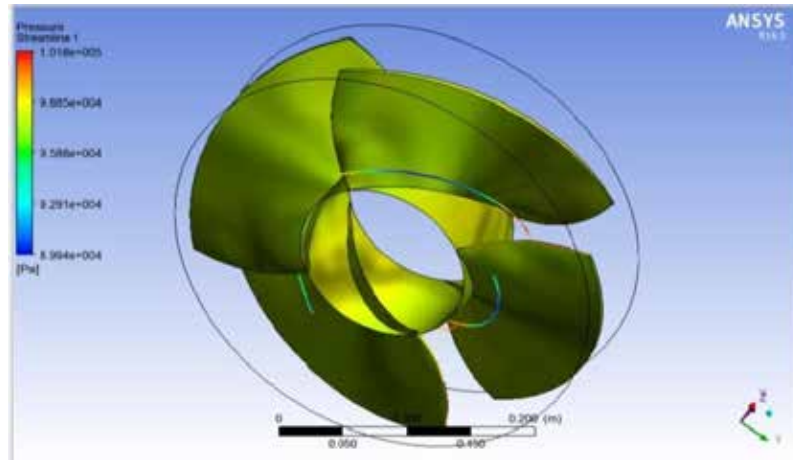


Figura 49. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

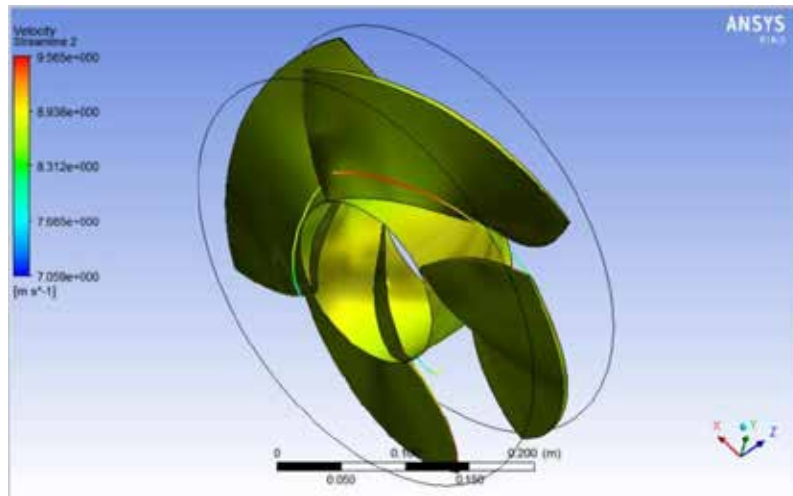
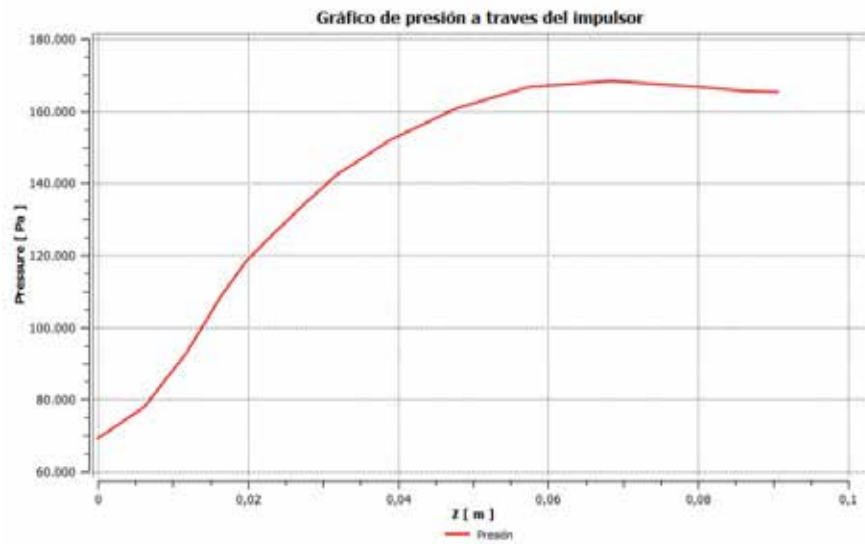


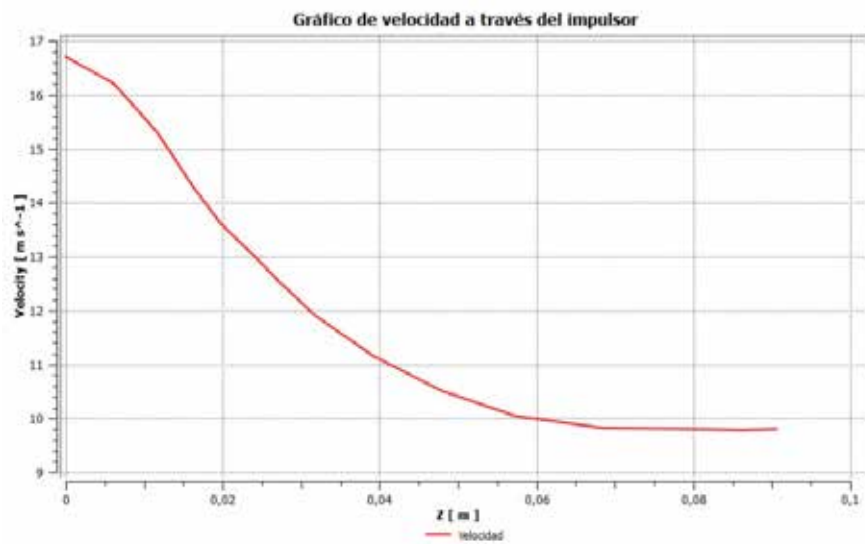
Figura 50. Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 850 rpm.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

Resultados del rotor girando a 1750 rpm.



Gráfica 6. Gráfica de la variación de presión del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.

Fuente: Piña, Rufa (2017)



Gráfica 7. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

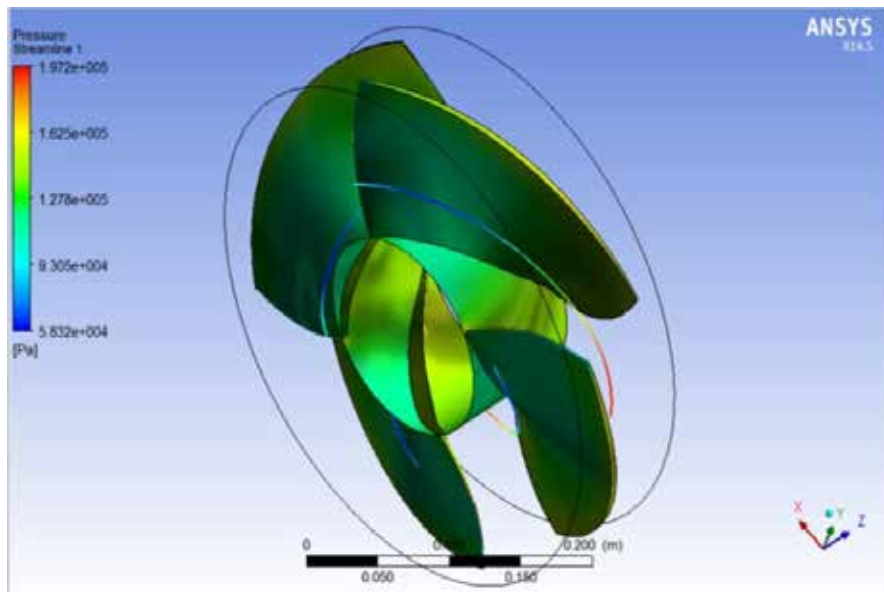


Figura 51. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

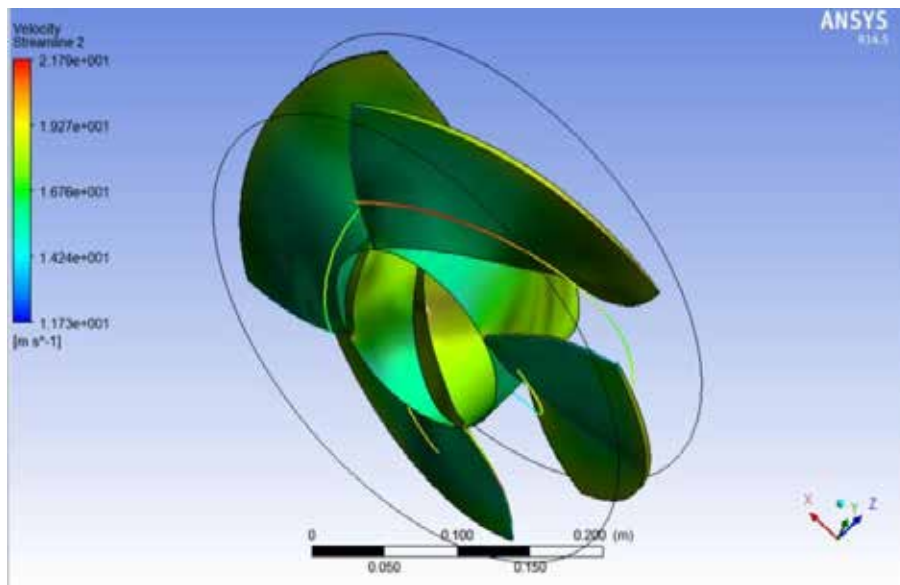


Figura 52. Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del rotor girando a 1750 rpm.
Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

La tabla 3 muestra la comparación entre las variaciones de presión que existen entre la entrada y la salida del rotor para las distintas velocidades de giro. Es notable que mientras mayor sea la velocidad angular del rotor, se alcancen variaciones de presión mayores. En el caso de la velocidad relativa, la variación de dicha propiedad se especifica en la tabla 4, notándose el hecho de que mientras mayor es la velocidad de giro del rotor, mayor es la variación de la velocidad desde la entrada hasta la salida, observándose que la mayor velocidad se encuentra a la entrada y a medida que el flujo atraviesa el impulsor, esta va disminuyendo.

Tabla 3. Variación de presiones absolutas entre la entrada y la salida del rotor.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

VELOCIDAD DE GIRO	Pentrada (KPa)	Psalida (KPa)	
850 RPM	191,72	198	6,28
1750 RPM	169,2	265,1	95,9

Tabla 4. Variación de velocidad relativa entre la entrada y la salida del rotor.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

VELOCIDAD DE GIRO	Ventrada (m/s)	Vsalida (m/s)	
850 RPM	8,25	7,43	0,82
1750 RPM	16,73	9,8	6,93

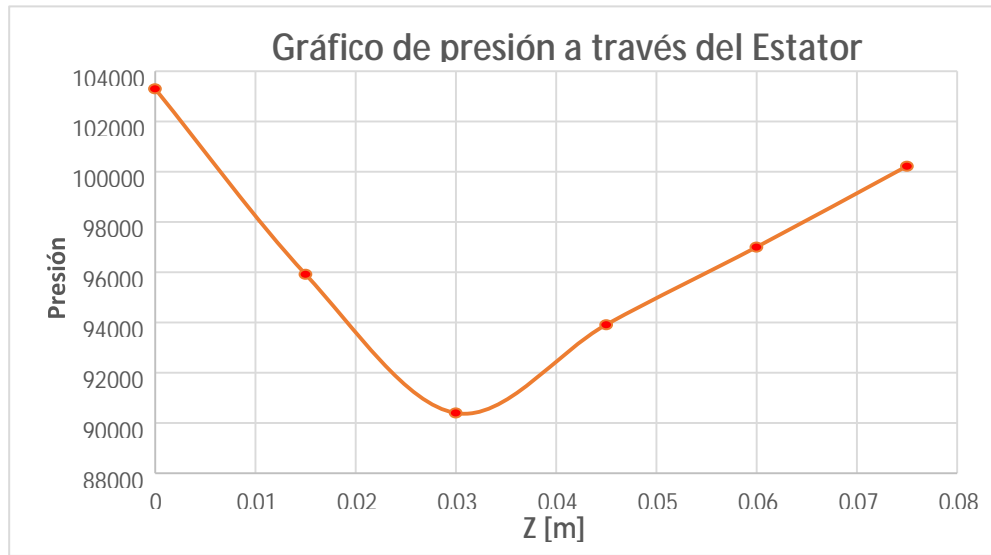
Resultados del estator obtenidos en la simulación.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del estator en las simulaciones realizadas, variando la velocidad de giro del estator y observando la variación de presión que ocurre desde la entrada hasta la salida del mismo, así como también la variación de la velocidad relativa.

Las simulaciones del estator se configuraron con un número máximo de 100 iteraciones y con un criterio de convergencia de un valor residual RMS de 1×10^{-4} , ya que con 100 iteraciones es suficiente ya que no hay movimiento en el estator y no es muy exigente.

· **Resultados del estator con velocidad de giro del rotor a 850 rpm.**

Una vez realizada la simulación, los datos obtenidos se representan en forma de gráficas para su comprensión e interpretación y lograr así visualizar el comportamiento del fluido cuando atraviesa el estator. Las variables que se estudian son Presión (Gráfica 8) y Velocidad (Gráfica 9).



Gráfica 8. Gráfica de variación de presión del flujo a través del estator con rotor girando a 850 rpm.

Fuente: Piña, Rufa (2017)



Gráfica 9. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través estator con rotor girando a 850 rpm.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

En las siguientes figuras (Figuras 53, 54, 55, 56) se muestran los planos ilustrativos de la variación de presión en la entrada y salida del estator. Se observa un aumento de presión a través de la entrada del flujo por el estator. Este aumento se debe a la energía transmitida por el giro del rotor a 850 y 1750 rpm, sin embargo, se observa una disminución de la presión ya en el momento de la salida del rotor.

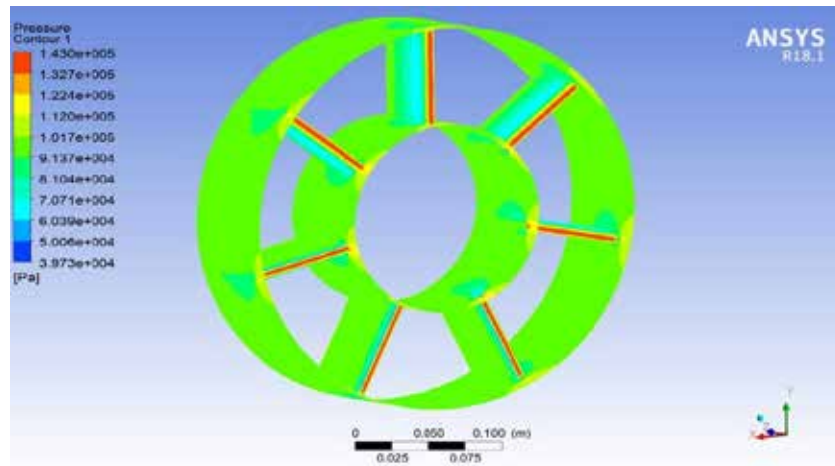


Figura 53. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la entrada del estator.

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

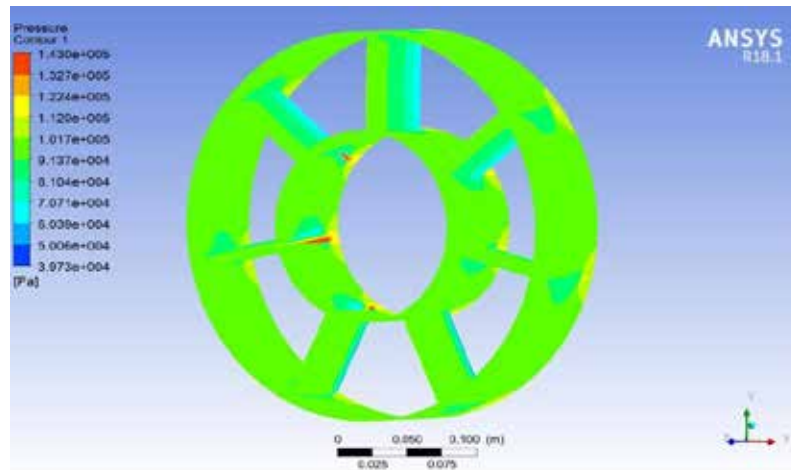


Figura 54. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la salida del estator

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

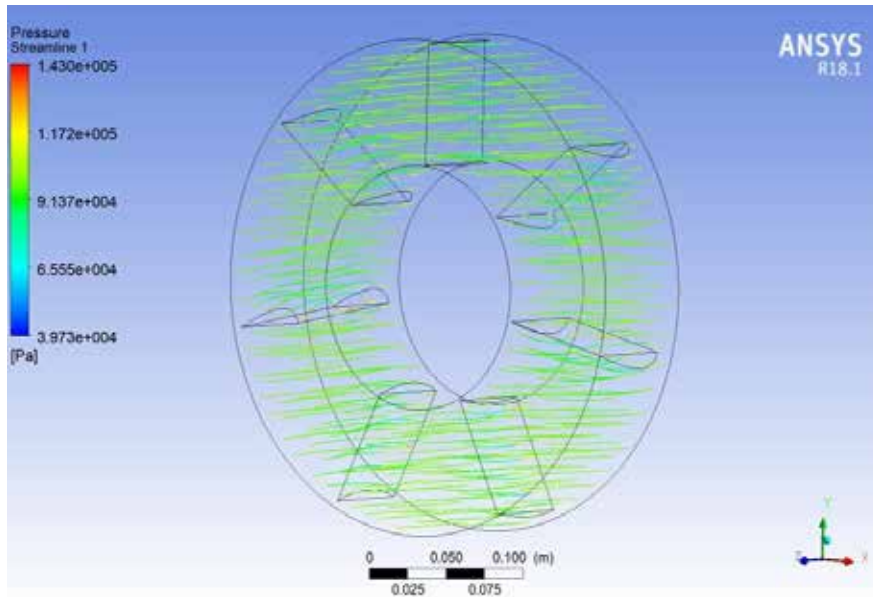


Figura 55. Representación de la variación de presión a través del estator mediante streamline.

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

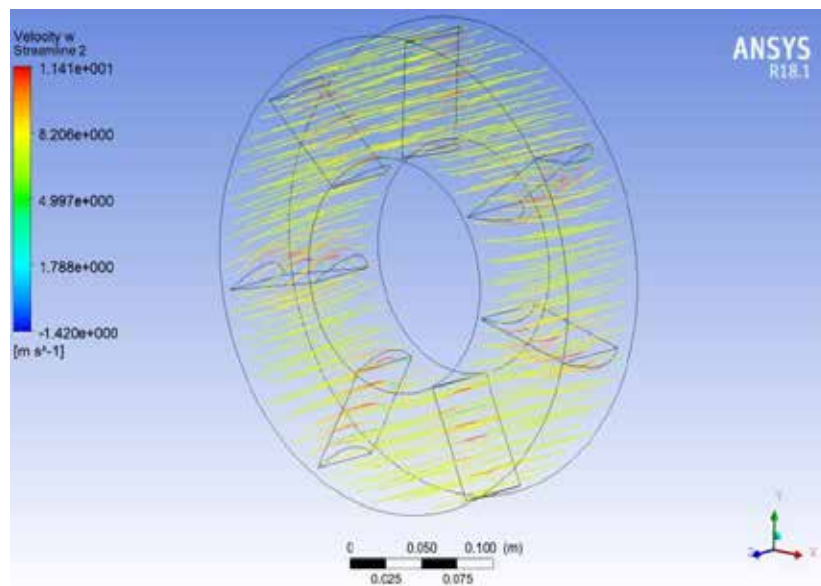
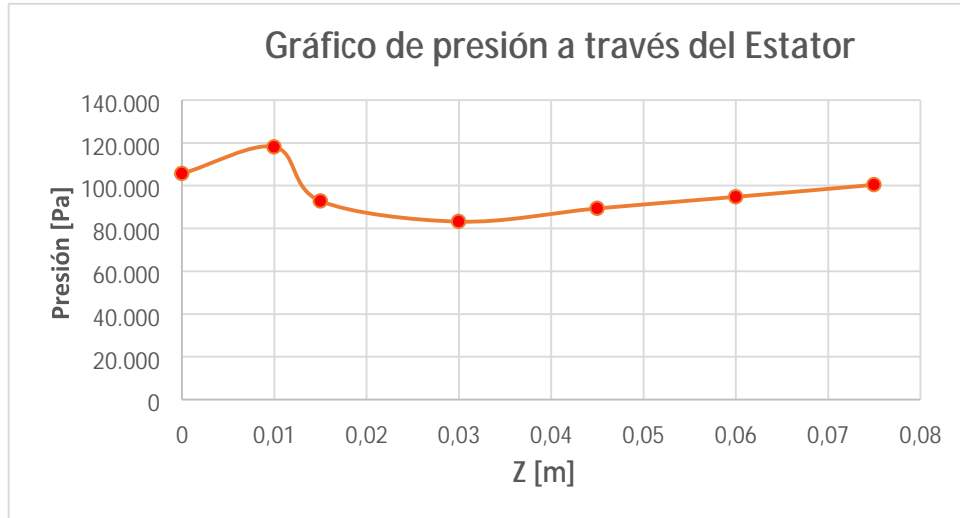


Figura 56. Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del estator mediante streamline con rotor girando a 850 rpm.

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

Resultados del estator con velocidad de giro del rotor a 1750 rpm.



Gráfica 10. Gráfica de variación de presión del flujo a través del estator con rotor girando a 1750 rpm.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

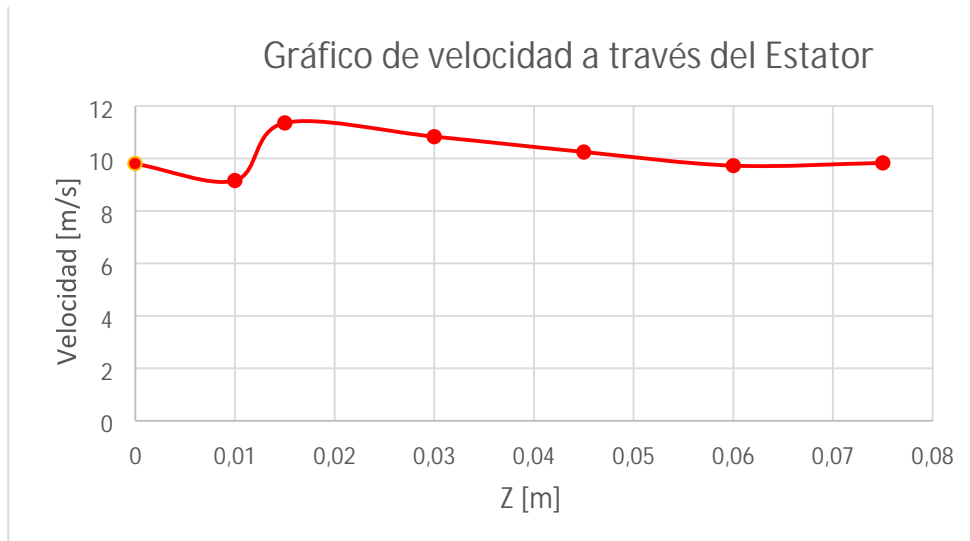


Gráfico 11. Gráfica de variación de velocidad del flujo a través estator con rotor girando a 1750 rpm.
Fuente: Piña, Rufa (2017)

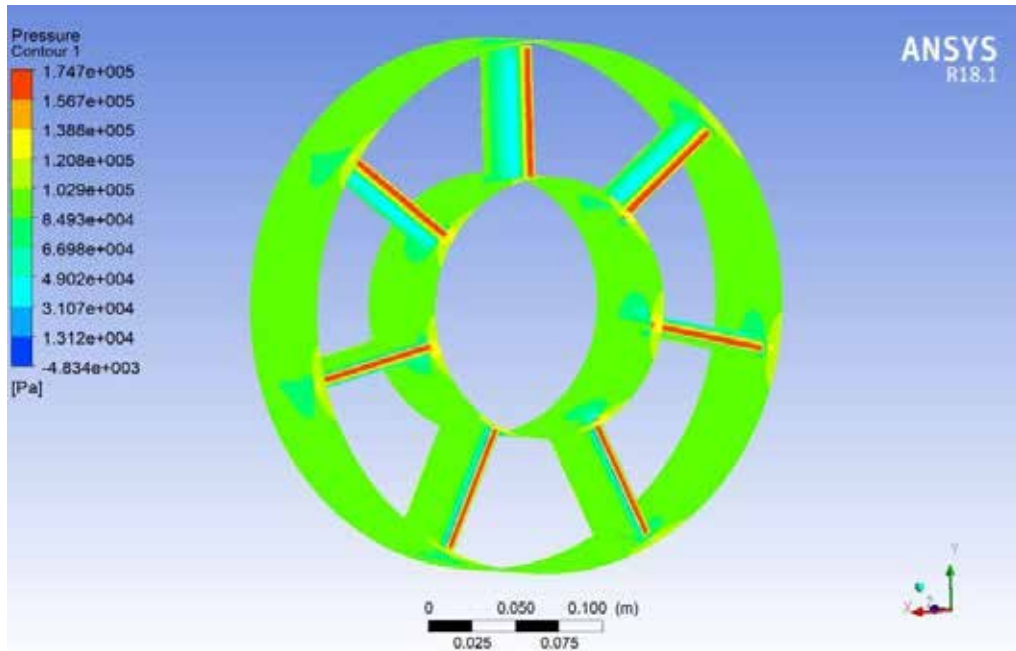


Figura 57. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la entrada del estator.

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

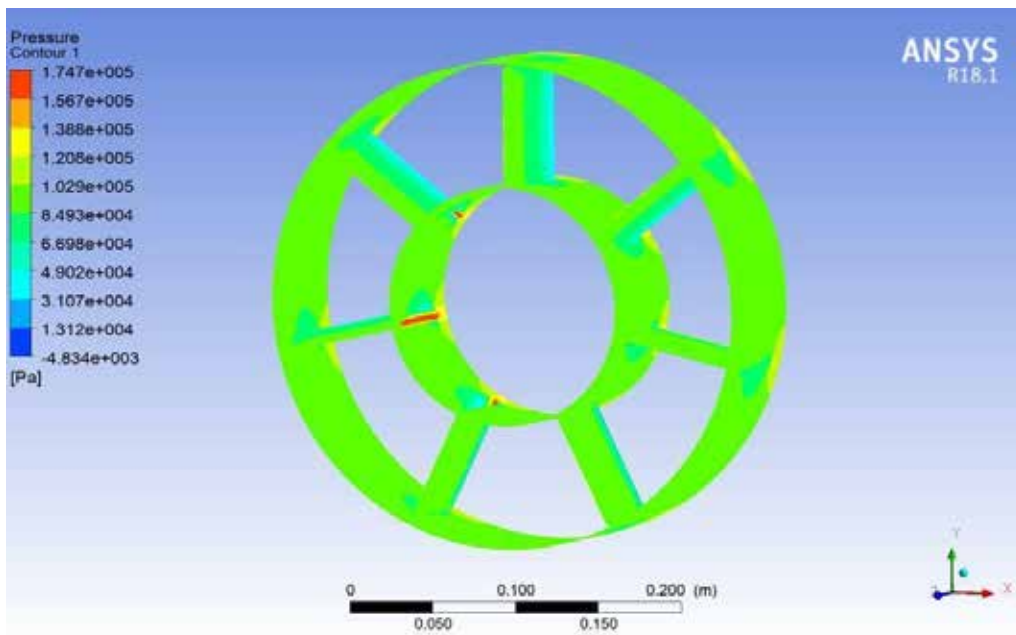


Figura 58. Plano ilustrativo de la variación de presión del flujo en la salida del estator

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

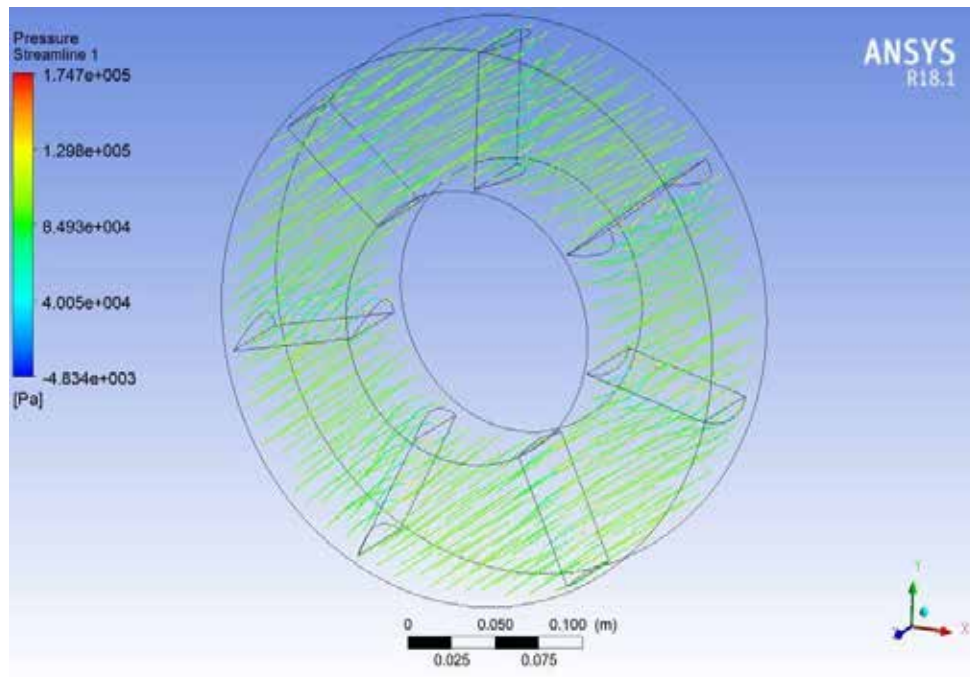


Figura 59. Representación de la variación de presión a través del estator mediante streamline con rotor girando a 1750 rpm.

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

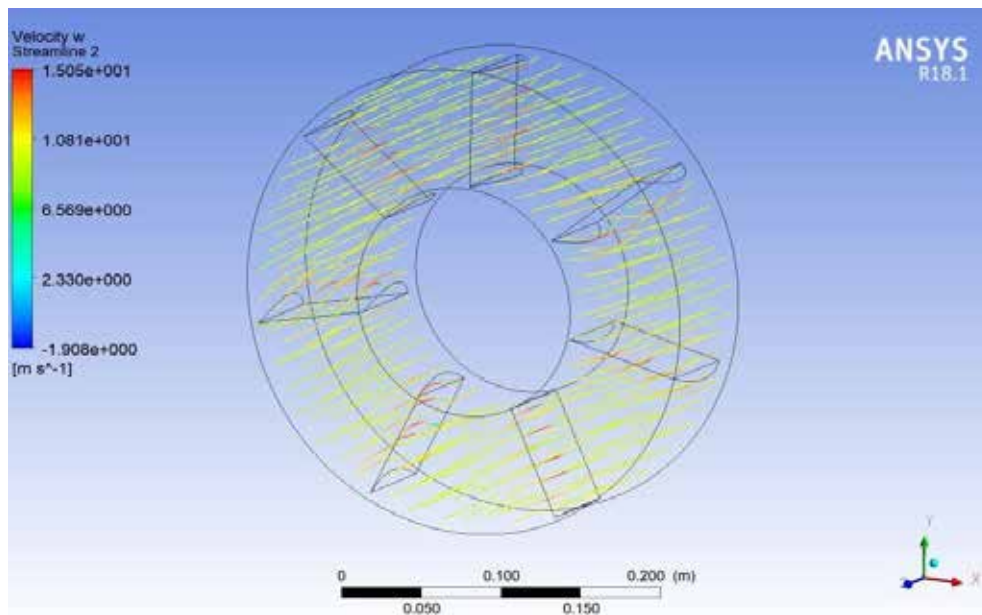


Figura 60. Plano ilustrativo de la variación de velocidad del flujo a través del estator mediante streamline con rotor girando a 1750 rpm.

Fuente: Ansys Workbench 18.1 (2017)

La tabla 5 muestra la comparación entre las variaciones de presión que existen entre la entrada y la salida del rotor para las distintas velocidades de giro. Es notable que mientras mayor sea la velocidad angular del estator, se alcancen variaciones de presión mayores. En el caso de la velocidad relativa, la variación de dicha propiedad se especifica en la tabla 6, notándose el hecho de que mientras mayor en el estator con velocidad de giro del rotor, mayor es la variación de la velocidad desde la entrada hasta la salida, observándose que la mayor velocidad se encuentra a la entrada y a medida que el flujo atraviesa el estator, esta va disminuyendo.

Tabla 5. Variación de presiones absolutas entre la entrada y la salida del estator.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

CON VELOCIDAD DE GIRO DEL ROTOR	Pentrada (KPa)	Psalida (KPa)	
850 RPM	204,627	201,428	3,119
1750 RPM	206,947	201,504	5,443

Tabla 6. Variación de velocidad relativa entre la entrada y la salida del estator.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

VELOCIDAD DE GIRO	Ventrada (m/s)	Ventrada (m/s)	
850 RPM	7,42658	7,44252	0,01594
1750 RPM	9,79579	9,8278	0,03201

4.1.2 Valoración de los resultados de la simulación.

Los resultados se validaran comparando la curva característica (H Vs Q) obtenida mediante la simulación a través de la herramienta computacional (CFD), con la curva experimental de un modelo comercial de una bomba axial.

Siguiendo con la metodología, a continuación se presentan los resultados (Tabla 7) de las simulaciones donde se obtuvo la curva (H vs. Q) del rotor axial, mediante la variación de caudales para una misma velocidad de giro y la lectura de los diferenciales de presión entre la entrada y la salida para posteriormente calcular la altura de máquina. La tabla 8 muestra los valores de caudal y altura para la bomba

KSB Amacan 350 A4, la cual fue utilizada como bomba modelo para comparar la tendencia de la curva H vs Q de esa bomba con la curva H vs Q del impulsor en estudio.

Tabla 7. Alturas para los distintos valores de caudal, impulsor girando a 850 rpm

Fuente: Piña, Rufa (2017)

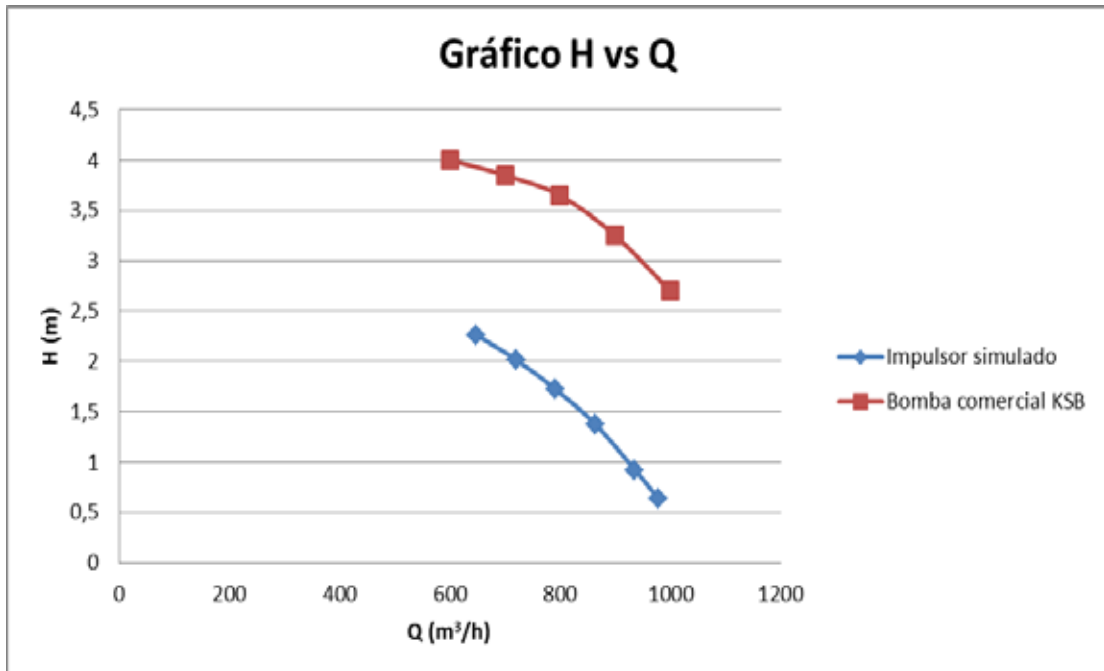
Caudal (m ³ /h)	P entrada (KPa)	P salida (KPa)	H (m.c.a.)
648	94,8	117	2,263
720	94,1	113,9	2,018
792	93,4	110,3	1,723
864	92,7	106,2	1,376
936	92,15	101,2	0,923
978	91,72	98	0,640

Tabla 8. Valores de caudal y altura para la bomba KSB Amacan 350 A4.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

Q (m ³ /h)	H (m)
600	4
700	3,85
800	3,65
900	3,25
1000	2,7

La generación de las curvas H vs Q para ambos casos se muestran en la Gráfica 12, en la cual se detalla que la tendencia de ambas curvas es la misma, a pesar de que no concuerdan exactamente con los mismos valores de altura, debido a que la curva de la bomba comercial gira a una velocidad angular mayor que el impulsor simulado en esta investigación, lo que genera que las alturas para cada valor de caudal de la bomba comercial sean mayores que las alturas del rotor.



Gráfica 12. Curvas H vs Q de la bomba comercial y el rotor simulado en la investigación.

Fuente: Piña, Rufa (2017)

4.2 Conclusiones y Recomendaciones

4.2.1 Conclusiones

- A través de la búsqueda y recolección de información referente al caso particular de estudio, que es el de una bomba axial, se determinó que el escoger una bomba comercial como base para el diseño proporcionaba la mayor cantidad de parámetros de funcionamiento de dicha turbomáquina, siendo mayor la información en cuanto a parámetros hidráulicos, y no dimensionales.
- La aplicación y el uso de la herramienta CAD (Inventor 2016) fue de gran utilidad, permitiendo realizar el modelado adecuado y más cercano a la realidad, en base a los parámetros hidráulicos de la bomba utilizados para determinar los diámetros adecuados del conjunto rotor-alabes guías. En cuanto a los alabes, se diseñaron en función de las geometrías observadas en diferentes investigaciones y con una apariencia física lo más cercana posible a la de la bomba comercial seleccionada, ya que dicha información no se encuentra especificada con precisión en el manual de dicha bomba.

- Se corrobora que a través de la herramienta de CFD, Ansys CFX, se puede alcanzar exitosamente el estudio y comportamiento de un fluido en el interior de una bomba axial a través de la adecuada desratización del dominio en estudio, así como la definición de sus condiciones de frontera con sus respectivos parámetros. En el presente caso de investigación, para la simulación del rotor las condiciones de frontera más adecuadas fueron presión estática de entrada (INLET) y flujo másico a la salida (OUTLET). En el caso del estator, se utilizó en la condición (INLET) la velocidad de salida del rotor y en la condición (OUTLET) la presión estática.
- La realización de la simulación a través de la configuración del número de iteraciones, del mallado para cada dominio y del modelo de turbulencia seleccionada (k- ϵ) con convergencia de las ecuaciones de conservación de la masa y momento para un criterio de convergencia de RMS $1e-05$.
- Los resultados arrojados por las respectivas simulaciones permiten observar satisfactoriamente el comportamiento del fluido en el interior de la turbomáquinas, dando a notar que en concordancia con el principio de funcionamiento de toda bomba centrífuga, en este caso de flujo axial, se obtiene un aumento de presión proporcionado por el giro del rotor y que a mayor velocidad de giro de este, mayor se hace el aumento de presión generado y por ende el diferencial de presión entre la entrada y salida. De igual forma se observa que, dicho aumento de presiones no es muy significativo, demostrando que las bombas axiales están diseñadas para el manejo de grandes caudales de fluido, a bajas cargas de presión.
- En base a la simulación realizada en el dominio estacionario (estator o alabes guías) sometido a las condiciones de salida del rotor, se concluye que su función neta es disminuir la turbulencia que conlleva el fluido al ser sometido a una velocidad de rotación, y adicionalmente a su misma vez, esta laminarización del flujo lleva a un aumento leve en la velocidad relativa del

fluido, en la componente normal al plano XY de la máquina, en otras palabras, en la dirección paralela al eje axial de la bomba (eje Z).

- Al comparar la tendencia de la curva H vs Q del impulsor simulado con la de la bomba comercial, es notorio que dicha tendencia es muy similar, por lo que se concluye que los resultados arrojados por la herramienta CFD son bastante cercanos a la realidad.
- La diferencia que se observa entre los valores de altura de la curva H vs Q de la bomba comercial y el impulsor simulado radica en el hecho de que la bomba comercial está girando a una velocidad angular mayor que la del impulsor, dado que esta se extrajo de un catálogo donde la frecuencia es de 50 Hz.
- Mediante la similitud observada en la comparación entre la gráfica obtenida de la simulación y la establecida por el fabricante, se concluye que la utilización de herramientas CFD para el estudio de turbomáquinas es un método que proporciona resultados factibles y muy cercanos a la realidad, logrando avances importantes en los campos de estudio relacionados, y en el ahorro económico para la construcción de bancos experimentales.

4.2.1 Recomendaciones

- Para una mayor eficacia y eficiencia en el campo de las simulaciones, se requiere de un poder computacional aceptable, que cumpla con las exigencias del software, y el poder contar con varios equipos procesadores para la investigación, aumentaría la efectividad en cuanto a ahorro significativo del tiempo. Esto también ayudara a aumentar la confiabilidad de resultados debido a menores limitaciones de tiempo.
- Llevar a cabo el estudio del conjunto rotor-alabes guías en una simulación solapada, para comparar la diferencia entre resultados y generar hipótesis referentes.
- Estudiar la cavitación y otros fenómenos que puedan generarse en el interior de la bomba axial para así determinar los efectos que esta genera en el desempeño de la turbomáquina en estudio y su vida útil.

- La utilización de herramientas para el diseño de impulsores, la cual permite dimensionar de acuerdo a la geometría deseada (diámetros, ancho de cara, ángulos de entrada y salida, número de álabes, etc.), las condiciones de trabajo de impulsor (velocidad angular, caudal) y las propiedades del fluido.

BIBLIOGRAFÍA

- Aung Kyaw Soe, Zin Ei Win, Myat Soe. (2015) **numerical flow analysis of an axial flow pump (Análisis de flujo numérico de una bomba de flujo axial)**. Revista Internacional de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IJEAS) ISSN: 2394-3661, Volumen-2, Edición-7.
- Blanco, E. y Fernández-Vina, F. y Fernández-Oro, J. y Scanlon, T.J. y Stickland, M.T. (2002) **Análisis numérico de una bomba semiaxial**. Conferencia nacional de la asociación de ingenieros mecánicos españoles.
- Hurtado, I. y Toro, J. (2007). **Paradigmas y Métodos de Investigación en tiempos de Cambios. Carcas: CEC**.
- Mataix, C. (1998) **Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas**. (2ª ed.). Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.
- Montevideo Z. Nehomar, Duarte T. Arnaldo D, Caraballo V. Gruber A. (2013) **Análisis numérico del campo de flujo a través del dominio fluidizado impulsor-voluta en una bomba centrífuga**. Revista Ingeniería UC, Vol. 20, No. 2.
- Ojeda Escoto, P., López Parra, M., Farah Simón, A., Ramírez Reivich, A. (2009) **CFD como una herramienta para diseño de productos**. Xv congreso internacional anual de la somim. Obregón, Sonora. México
- Tamayo y Tamayo, Mario. **El Proceso de la Investigación científica**. Editorial Limusa S.A. México.1997.
- Torio García, H. (2014) **Máquinas Hidráulicas, Bombas y Turbinas**. Universidad Veracruzana facultad de ingeniería mecánica y eléctrica
- Universidad José Antonio Páez. (2007). **Normas para Elaboración y Presentación de los Anteproyectos, Proyectos y Trabajos de Grado**. San Diego, Carabobo, Venezuela
- Vélez, S. Carlos M (2001) **Apuntes de metodología de la investigación**. Departamento de ciencias básicas Universidad EAFIT, Medellín – Antioquia.

[En línea] Disponible en: <https://es.slideshare.net/saratogawild/apuntes-metodologia-investigacin>.

Zhongdong QIAN 1, Yan WANG 1, Wenxin HUAI 1 y Youngho LEE 2. (2010). **numerical simulation of water flow in an axial flow pump with adjustable guide vanes. (Simulación numérica del flujo de agua en una bomba de flujo axial con paletas guía ajustables)**. State Key Laboratorio de Recursos Hidráulicos y Ciencias de Ingeniería Hidroeléctrica, Universidad de Wuhan, Wuhan 430072, P. R. China. 2. División de Ingeniería Mecánica e Información, Universidad Marítima de Corea, Busan 606-791, Corea.