 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Construcción numérica de curva característica de una bomba centrífuga utilizando CFX®

Luis Fernando Acevedo Román

Alexander Rafael Meza Pérez

Tecnología Electromecánica

Director

Juan Gonzalo Ardila Marín

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2017

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El proceso de elaboración de la curva característica tras la fabricación de una bomba, se lleva a un banco experimental acondicionado para tal tarea, allí se documentan los límites de caudal y presión a los que puede ser sometido el equipo, cabe resaltar que cada bomba tiene su curva característica particular la cual tiene una directa relación con la geometría del impulsor y la voluta. Este proceso requiere tiempo y cuantiosos recursos económicos. Las herramientas computacionales facilitan este trabajo, así mismo, reducen tanto el costo y el tiempo del proceso de diseño de estos dispositivos, en comparación con el proceso que se lleva a cabo vía experimentación en laboratorio. El presente trabajo buscó simular una bomba centrífuga utilizando CFX® para construir numéricamente su curva característica. Para esto se consultó sobre simulación de bombas centrífugas con ANSYS® para establecer un referente en las simulaciones, luego se desarrolló la geometría de la bomba centrífuga, y más particularmente, del volumen de control fluido a simular, según el referente seleccionado, se utilizó las herramientas BladeGen® y DesignModeler® de ANSYS®, después discretizó el volumen de control de la simulación, empleando el módulo Meshing® de ANSYS®, se evaluaron los resultados de simulación tal que garantizaran independencia de malla, y por último, se configuró y corrió el estudio de simulación variando los caudales y obteniendo los resultados de cabeza, potencia y eficiencia por cada régimen seleccionado según el referente, para construir la curva característica de la bomba simulada.

Palabras clave: Bomba centrífuga, impulsor, cabeza, CFX, CFD, ANSYS

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Para esta tesis queremos agradecerle al grupo de Materiales Avanzados y Energía MATyER, a la línea de Computación Avanzada, Diseño Digital y proceso de Manufactura (CADD) y al Semillero de Computación Avanzada, Diseño Digital y Manufactura Asistida por Computación (SeCADD-CAM) por poner a disposición sus equipos en los que se llevaron a cabo las simulaciones en investigaciones. También queremos resaltar a los compañeros del semillero de SeCADD-CAM por brindarnos amablemente su asesoría en temas de simulación.

Dedicamos un especial agradecimiento a nuestros padres por apoyarnos de forma desinteresada en este camino, su paciencia ha hecho de nosotros persona dignas de afrontar los problemas de la sociedad con conocimiento, valentía y madurez.

Finalmente, a nuestro tutor y maestro Juan Gonzalo Ardila Marín por sus oportunas recomendaciones, por su carisma y no dejarnos desistir.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Generalidades.....	6
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Organización de la tesis.....	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Bombas centrífugas	8
2.1.1. Clasificación de las bombas centrífugas	9
2.2. Curvas características de bombas centrífugas	11
2.3. Construcción experimental de curvas características	13
2.4. Dinámica de fluidos computacional	15
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1. Desarrollo Geométrico	19
3.2. Mallado de geometría	24
3.2.1. Independencia de malla.....	24
3.3. Simulación en CFX.....	25
3.3.1. Configuración de la simulación	25
3.3.1.1. Modelo de turbulencia k-ε	27
3.3.2. CFX solver.....	29
3.3.3. CFX Post	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	38
REFERENCIAS	40

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de bomba centrífuga, en este se aprecian sus partes fundamentales. Fuente: (Fernandez, 2010).....	8
Figura 2 curvas características de bombas centrífugas de alta presión con diferentes diámetros (W, Pumpen Intelligenz, 2005)	12
Figura 3 Curvas características por simulaciones y experimental. Fuente: (Jafazadeh, Hajari, Alisshahi, & Akabari, 2011).....	12
Figura 4 Banco experimental para realizar curvas características. Fuente: (Universidad de Valladolid)	13
Figura 5 Estudio de una sección de una bomba centrífuga mediante CFD. Fuente: ANSYS®.	16
Figura 6 Simulación de una bomba centrífuga mediante CFD. Fuente: (Dorshch, 2007).	17
Figura 7 Contorno total de la VistaCPD®. Fuente: ANSYS ®	20
Figura 8 Elaboración de la geometría en 2D desde la herramienta VistaCPD®. Fuente: ANSYS ®. ..	20
Figura 9 Transferencia de la Vista CPD® al módulo Bladegen®. Fuente: ANSYS ®.....	21
Figura 10 Pala vista desde el módulo Bladegen® así como el sistema a controlar. Fuente: ANSYS ®.	21
Figura 11 cambio en la dirección de las palas. Fuente: ANSYS ®.....	22
Figura 12 Volúmen de control en uno de los álabes. Fuente: ANSYS ®.	22
Figura 13 Creación del patrón de repetición en el álabe. Fuente: ANSYS ®.....	23
Figura 14 Volumen de control del impulsor completo sin álabes. Fuente: ANSYS ®.....	23
Figura 15 Mallado correspondiente al estudio creado por defecto via Meshing®. Fuente: ANSYS ®.	24
Figura 16 Estudio de independencia de malla por medio de parámetros. Fuente: ANSYS ®.....	24
Figura 17 Herramienta Turbo Mode de CFX. Fuente: ANSYS ®.	26
Figura 18 Configuración de la bomba. Fuente: ANSYS ®.....	26
Figura 19 Configuración de la velocidad del rotor. Fuente: ANSYS ®.	26
Figura 20 Condiciones del sistema a analizar. Fuente: ANSYS ®.	27
Figura 21 Configuración de los factores de convergencia. Fuente: ANSYS ®.....	28
Figura 22 Cálculo de la presión a la salida del impulsor. Fuente: ANSYS ®.	31
Figura 23 Calculo de la cabeza de la bomba. Fuente: ANSYS ®.	32
Figura 24 Configuración de líneas de corriente. Fuente: ANSYS ®.	33
Figura 25 Animación del flujo que pasa a través del impulsor. Fuente: ANSYS ®.	33
Figura 26 Duplicado del módulo CFX. Fuente: ANSYS ®.....	34
Figura 27 Líneas de flujo afectado por la presión a través del impulsor. Fuente: ANSYS ®.	36
Figura 28 Contorno de presión en el perfil del álabe. Fuente: Ansys®.....	36
Figura 29 Líneas de flujo afectado por la velocidad a través del impulsor. Fuente: Ansys®.....	37

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Cada bomba tiene su curva característica específica, estas son proporcionadas por el fabricante y en ellas se pueden leer información importante concerniente al tipo de caudal de entrada y a la altura de cabeza que causa dicho caudal. **Según Mott existen tres tipos de caudales: el flujo en peso, el flujo másico y el flujo volumétrico (Mott, 2006), siendo este último materia de investigación en el presente trabajo.** Las curvas sirven para determinar el rango de acción en el que se puede someter la máquina rotodinámica aprovechando su máximo funcionamiento. Tanto la geometría del impulsor como la de la voluta juegan un papel importante dentro de la descripción de esta curva. Para el diseño y la generación de este tipo de curvas se requiere un laboratorio con condiciones especiales y con instrumentos de medición tales como vacuómetros, manómetros y variadores de velocidad; así como válvulas, tuberías de succión e impulsión, filtros, unidad motriz y un espacio de condiciones apropiadas para el tránsito de fluidos. El proceso de realización de una curva característica requiere de disposición de tiempo y cuantiosos recursos económicos debido a la particularidad de cada bomba. Estas mismas curvas se desarrollan a través de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), rama de la mecánica de fluidos. CFD provee soluciones numéricas a ecuaciones que gobiernan un problema: A través de esta ciencia se diseñan, modelan y generan geometrías que imitan una bomba, al igual que se establecen condiciones en su contorno de pendiendo del análisis del fenómeno físico que se desee estudiar y de la capacidad de cómputo (Sánchez Vázquez , 2017). El presente trabajo busca encontrar la curva característica de una bomba centrífuga mediante métodos numéricos por medio de simulación, en donde se relacionarán la caída de presión con el caudal del fluido. Esta simulación se realizó a través del paquete de programas de ANSYS® V18.1 en el Laboratorio de Modelado del grupo de investigación en Materiales Avanzados y Energía del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (MATyER-ITM).

1.2. Objetivos

General

Simular una bomba centrífuga utilizando CFX® para construir numéricamente su curva característica.

Específicos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. Consultar sobre simulación de bombas centrífugas con ANSYS® para establecer un referente para las simulaciones.
2. Desarrollar la geometría de la bomba centrífuga, y más particularmente, del volumen de control fluido a simular, según el referente seleccionado, utilizando las herramientas BladeGen® y DesignModeler® de ANSYS®.
3. Discretizar el volumen de control de la simulación, empleando el módulo Meshing® de ANSYS®, y evaluando que los resultados de simulación garanticen independencia de malla.
4. Configurar y correr el estudio de simulación variando los caudales y obteniendo los resultados de cabeza, potencia y eficiencia por cada régimen seleccionado según el referente, para construir la curva característica de la bomba simulada.

1.3. Organización de la tesis

En el marco teórico se define la bomba centrífuga, se describen sus partes fundamentales, se disciernen los distintos tipos de bombas de acuerdo a sus características mecánicas, dirección de flujo, tipo de entrada, capacidad de caudal, posición de eje y número de impulsores. Se define la curva característica, se describe el laboratorio acondicionado para la construcción de una curva característica de una bomba centrífuga. Se define CFD, al tiempo que se relacionan los estudios de las bombas que se han elaborado en la literatura.

En la metodología se describe detalladamente el camino que los autores hicieron para llegar a la curva característica, partiendo del desarrollo del geométrico, el volumen de control, el mallado, el criterio de independencia de malla, la configuración de la simulación, el módulo solver CFX, así como el resultado de la simulación en CFX post y la construcción de la curva característica.

En los resultados y discusión se analizan los puntos que describen una curva característica encontrados en la simulación, así como se compara con el referente en el que se basó el estudio. Igualmente se describe el comportamiento del fluido con respecto al cambio de presión que se genera en el impulsor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Bombas centrífugas

La bomba centrífuga es una máquina roto-dinámica que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que la atraviesa en forma de energía hidráulica. Estas son necesarias para transportar líquidos y vencer las pérdidas de carga en un sistema de tuberías. Aunque existen numerosos tipos de construcción, todas las bombas centrífugas tienen en común una entrada axial del líquido al rodete de la bomba (Wilo Pumpen Intelligenz Ltd., 2005). La Figura 1 representa esquemáticamente sus partes, Fernández las caracteriza y las divide en cuatro partes fundamentales:

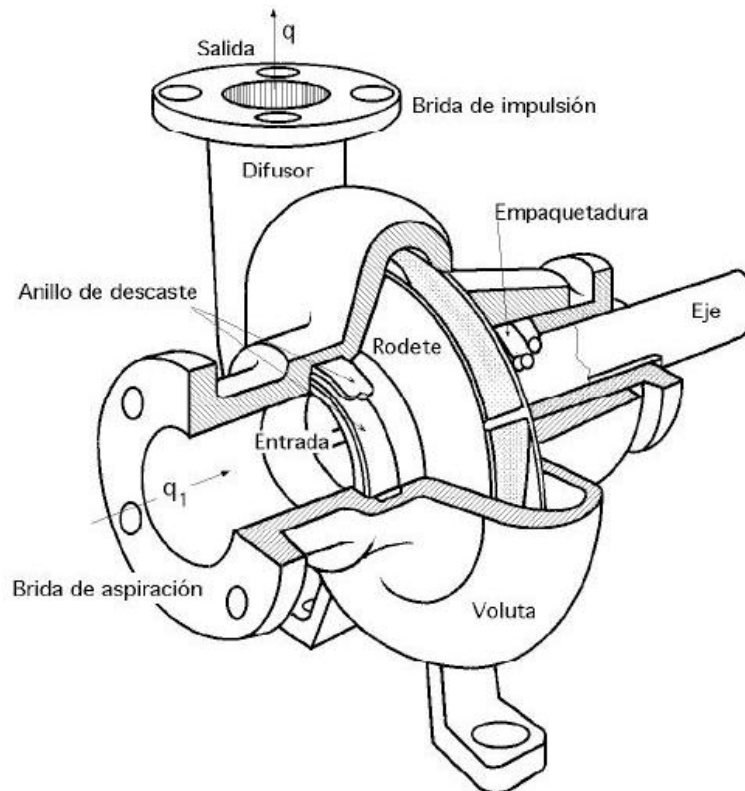


Figura 1. Esquema de bomba centrífuga, en este se aprecian sus partes fundamentales. Fuente: (Fernandez, 2010)

- a) **Una tubería de aspiración**, que concluye en la brida de aspiración.
- b) **El impulsor o rodete**, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

- c) **La voluta**, es un órgano fijo que está dispuesto en forma de caracol alrededor del rodete. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba. La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, convirtiendo parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.
- d) **Tubería de impulsión**, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba (Fernandez, 2010).

El funcionamiento de esta máquina roto-dinámica lo describe Fuchbche de la siguiente forma: si se hace girar el rodete, las paletas comunican un movimiento giratorio al agua que se encuentra dentro de éste. La fuerza centrífuga que se engendra de este modo hace salir el agua de las canales de las paletas de modo que se produce un vacío en el interior del rodete. A consecuencia de esta depresión, la presión atmosférica que actúa en la superficie del agua del pozo, pone en movimiento el agua de la columna del interior del tubo de la aspiración y el agua entra hacia el rodete, con una velocidad y una presión determinadas, saliendo del tubo de aspiración. Así, pues, el vacío que se produce en el interior del rodete se vuelve a llenar con agua inmediatamente, mientras que, por la periferia del rodete, el agua sale con una velocidad y una presión determinadas, para entrar en la voluta (...).

Como el agua elevada se mueve, por consiguiente, en forma de una corriente ininterrumpida que pasa del pozo al tubo de la aspiración, el rodete, la voluta, la tubería de la impulsión y la boca de salida, no son necesarias las válvulas ni las cámaras de aire.

La fuerza centrífuga creadas por el giro del rodete produce el trabajo necesario para la elevación del agua, por lo cual, la altura de elevación depende principalmente del número de revoluciones y del diámetro del rodete. Además, la forma de la paleta tiene una influencia considerable en la altura de elevación (Fuchbcher & Kaemer, 1954).

2.1.1. Clasificación de las bombas centrífugas

Álvarez clasifica las bombas centrífugas es seis, esta clasificación la hace dependiendo de la dirección del flujo de entrada y salida, la entrada del flujo de admisión, su construcción mecánica, su caudal, la posición del eje y número de posiciones en serie (Alvarez C, Gonzales S, & Alvarez G, 2004).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Según la dirección del flujo de entrada y salida

Se clasifican en:

- Centrífugas de flujo radial: El flujo entra axial (paralelo al eje) y sale radial (perpendicular al eje)
- Centrífugas de flujo mixto: El flujo entra axial y sale con componente axiales y radiales; su comportamiento se halla entre la bomba axial y la radial.
- Centrífugas de flujo axial: El flujo entra axial y sale axial

Según la entrada del flujo de admisión

En bombas de succión simple y succión doble, según que el fluido entre por uno o dos lados de la bomba. La doble succión se usa con el fin de compensar el desequilibrio que produce una sola succión, lográndose un funcionamiento equilibrado.

Según construcción mecánica

- De impeler (rotor, impulsor o turbina) abierto: Cuando la holgura entre el rotor o el impulsor y la carcasa es grande, apareciendo el rotor sin tapas o discos laterales, o sea que rota libremente dentro de la carcasa. Son bombas de baja presión (hasta 100 lb/pul²) pero que pueden bombear fluidos con sólidos en suspensión (viruta, trapos, hojas, etc) sin atascarse.
- Impeler semi-cerrado: Caso intermedio entre los dos anteriores, cuando un solo disco va adherido al rotor, produciendo presiones medias (100 a 500 lb/pul²).
- Impeler cerrado: Cuando el rotor está recubierto lateralmente por dos tapas o discos en forma solidaria. Estas bombas producen alta presión > 500 lib/pul², pero sólo bombean bien líquidos sin sólidos.

Según el caudal

Las bombas rotativas se pueden clasificar según el caudal que bombean así:

- Volumen bajo: hasta 50 GPM (0.2 m³/min).
- Volumen medio: 50 a 500 GPM (0.2 A 1.9 m³/min).
- Volumen grande: > 500 GPM (1.9 m³/min)

Según posición del eje

Se clasifican en bombas de eje horizontal, eje vertical y eje inclinado. Las radiales normalmente son de eje horizontal, mientras que las axiales son generalmente de eje vertical.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Según el número de impulsores en serie(etapas)

Esta clasificación se hace normalmente para las bombas axiales, sobre todo para las sumergibles, y según el número de impulsores se clasificarán así:

Un impulsor 1 etapa
 Dos impulsores 2 etapas

Y así sucesivamente.

Esta construcción de varios impulsores en serie, permiten obtener en forma económica grandes alturas o cabezas de descargas pues la presión de descarga del impulsor, será la presión de succión sumándose a esta la presión e da él y así sucesivamente.

2.2. Curvas características de bombas centrífugas

La curva característica de una bomba centrífuga indica los posibles puntos de trabajo en el cual puede funcionar como está previsto por su fabricante; comúnmente relaciona la altura de la presión del impulsor con el caudal del fluido como se ejemplifica en la Figura 2. Las curvas están trazadas para una velocidad constante en las que se varía la capacidad del caudal de la bomba (León Simanca & Agudelo Florez, 2002). Particularmente, la bomba tiene su máximo rendimiento en un solo punto de la curva, este punto se denomina punto de funcionamiento característico. De forma ideal una bomba debería trabajar en un rango cercano a este punto (Franzini, 1999).

Se han encontrado dos tipos de curvas que describen la relación del caudal con la altura de cabeza:

- A) la curva estable es aquella que a medida que aumenta el caudal disminuye la altura de cabeza.
- B) La curva inestable es aquella que inicialmente aumenta la cabeza con el caudal y después de cierto punto disminuye la primera mientras la segunda sigue aumentando.

La forma de la curva característica tiene relación directa con la forma del rodete, la velocidad, el número de álabes, la forma de la voluta (León Simanca & Agudelo Florez, 2002).

Existen, además, curvas que relacionan el rendimiento de la bomba en con el flujo volumétrico. Jafazadeh contrastó los resultados de la simulación de la curva característica de una bomba centrífuga con los datos experimentales disponibles y obtuvo un resultado muy similar (Jafazadeh, Hajari, Alisshahi, & Akabari, 2011). Sus deducciones relacionaron el porcentaje de eficiencia de cabeza de la bomba con el coeficiente del caudal del fluido como se muestra en la Figura 3.

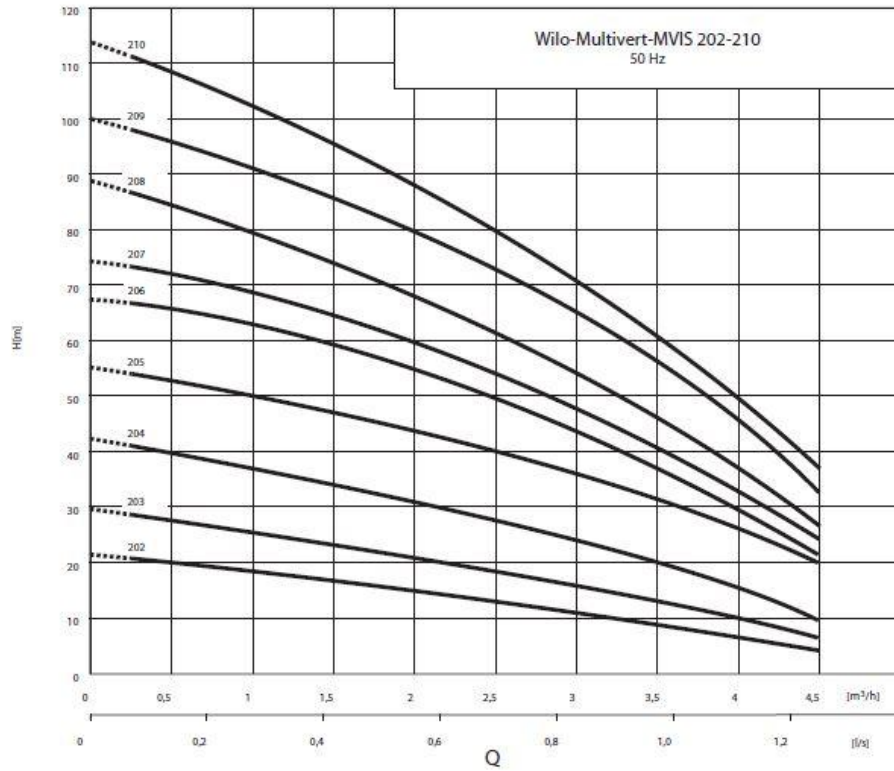


Figura 2 curvas características de bombas centrífugas de alta presión con diferentes diámetros (W, Pumpen Intelligenz, 2005)

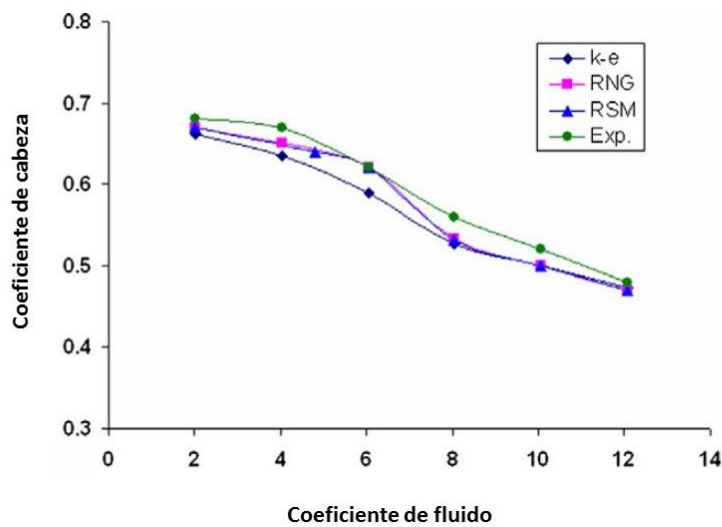


Figura 3 Curvas características por simulaciones y experimental. Fuente: (Jafazadeh, Hajari, Alisshahi, & Akabari, 2011).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3. Construcción experimental de curvas características

En un banco de pruebas es posible determinar la curva característica real de una bomba de manera sencilla. Es necesario disponer de un dispositivo que permita medir la presión del fluido a la entrada (manómetro diferencial o vacuómetro) y a la salida de la bomba (manómetro diferencial, piezómetro, manómetro Buordon); cuando la bomba se opera para diferentes caudales de bombeo (también deben medirse), generalmente se regulan con una válvula colocada en la descarga. Para cada caudal elegido el planteamiento de la ecuación de energía entre los puntos de entrada y salida de la bomba permitirá determinar la altura dinámica total (HDT), energía que la bomba le suministra al fluido.

Para realizar una prueba en el banco experimental se debe: a) Acondicionar todos los elementos necesarios para realizar la prueba (sensores de medición); b) iniciar la bomba con ayuda del variador de velocidad hasta llegar a la velocidad deseada; c) ajustar el caudal deseado por medio de la válvula reductora de caudal; d) tomar las medidas de presión necesarias para encontrar el punto de la curva; e) variar el caudal de nuevo para hallar el siguiente punto. (Universidad de Valladolid)

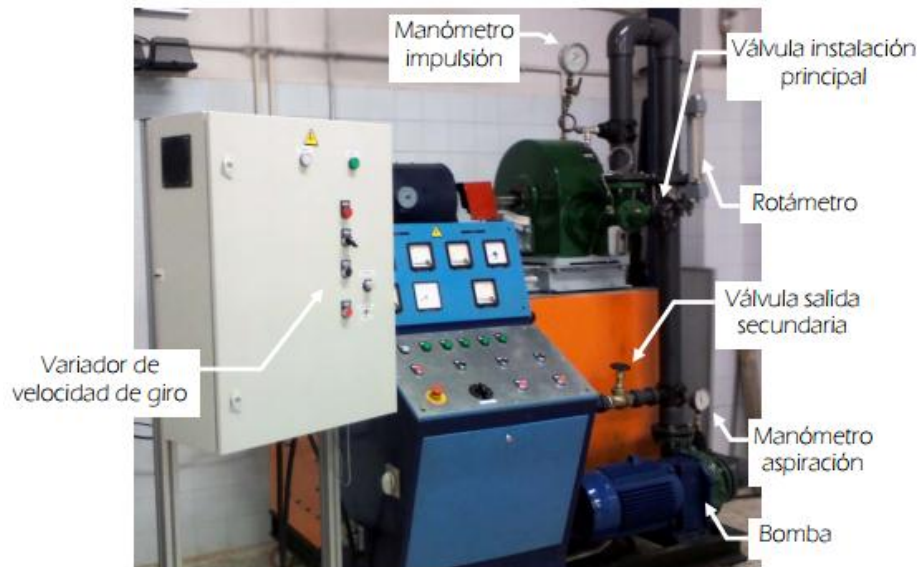


Figura 4 Banco experimental para realizar curvas características. Fuente: (Universidad de Valladolid)

La curva característica teórica de una bomba es una línea recta, esto debido a que no se tienen en cuenta en los análisis teóricos (imposibilidad de número infinito de álabes, fricción en el rodete, turbulencia por entrada del flujo al rodete, fugas interiores, pérdidas mecánicas) se obtiene con base en las pruebas de laboratorio, que la curva característica es de segundo grado o superior y se encuentra obviamente por debajo de la curva característica teórica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Conocidos el caudal Q, y la altura total, HDT, es posible establecer la potencia que la bomba le suministra al fluido y que corresponde la potencia hidráulica.

Con el fin de determinar la potencia suministrada por el eje a la bomba o potencia al freno, en el bando de pruebas se debe disponer de dispositivos para determinar el torque y la velocidad angular del eje.

La relación entre la potencia suministrada al fluido y la potencia al freno suministrada a la bomba establecerá la eficiencia de la misma para cada punto de operación, esto es, para cada caudal de bombeado.

Condiciones de succión

Todas las bombas centrífugas, así como las bombas de otro tipo, funcionan normalmente cuando la presión absoluta a la entrada tiene un valor superior al valor mínimo adecuado, que corresponde a la presión de vapor del líquido transportado. De no ser así, a la entrada del líquido en los canales formados por los álabes la presión absoluta alcanzaría un valor mínimo y se presentaría la cavitación, destruyendo de este modo la homogeneidad la corriente.

En las bombas centrífugas la energía máxima disponible que permite que el líquido fluya por la tubería de succión hasta el impulsor es la altura absoluta total de la succión, menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

La altura absoluta disponible, medida a la entrada de la bomba, recibe el nombre de Energía Neta Positiva de Succión (ENPS o NPSH) (Net Positive Suction Head).

Con esta definición es muy importante, entonces, considerar que para que una bomba centrífuga funcione adecuadamente, como mínimo requiere una ENPSR que es función del diseño de la bomba y representa el mínimo valor de energía requerida para garantizar que el líquido llegue adecuadamente al rodete o la mínima diferencia que necesita la máquina entre la energía de succión y la presión de vapor a la capacidad dada.

Así mismo en un sistema de bombeo cualquiera, en la succión se tendrá una Energía Neta Positiva de Succión Disponible $(ENPS)_D$ que corresponde a la diferencia entre la energía absoluta disponible en la succión y la presión de vapor (Sarrate & Albercht, 1996). Es decir

$$(ENPS)_D = EAS - PV$$

Donde:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

EAS: energía absoluta disponible en la succión (m)

$$EAS: \frac{P}{\gamma} \pm h_s - h_{fs}$$

Con:

$\frac{P}{\gamma}$ = presión atmosférica local (en metro). Columna de líquido bombeado.

h_s = altura estática en la succión, que corresponde a la distancia vertical existente entre el nivel de alimentación y el eje de la bomba. Este valor es positivo si el nivel de alimentación está por encima del eje de la bomba y negativo en caso contrario(m).

H_{fs} = Pérdidas totales, fricción y accesorios en la succión(m).

Banco de pruebas

El banco de pruebas de bombas centrífugas, disponible en el laboratorio de hidráulica, está conformado por:

- Tanque para la alimentación de las bombas.
- Tanque de descarga, provisto de un vertedero para la determinación de caudales de bombeo.
- Dos bombas centrífugas que pueden trabajar independientemente, en serie o paralelo.
- Contador eléctrico para la determinación de la potencia eléctrica consumida por el motor.
- Dispositivo y dinamómetro para determinar el torque del eje de la bomba.
- Fococelda para determinar la velocidad angular del eje.
- Manómetros diferenciales y de Bourdon, para determinar las precisiones en diferentes puntos del sistema.

2.4. Dinámica de fluidos computacional

Una manera de estudiar bombas centrífugas es mediante la mecánica de fluidos computacional (CFD). Esta ciencia proporciona una simulación de estas turbo-máquinas, economizando tiempo y dinero en comparación con la experimentación en laboratorio. A través del paquete de programas de la empresa Ansys® se puede analizar el fenómeno del fluido que pasa por esta bomba y elaborar el estudio que se desea con una gran exactitud.

Pelegri anota que CFD considera a la bomba como una máquina que trabaja con fluidos incomprensibles, la malla que utilizó para su cálculo comprende la entrada (inlet), el espacio

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

entre dos álabes (impeller blade passage) y la salida (outlet); por razones de simetría y para acelerar el cálculo, se simula únicamente el espacio entre dos álabes (Figura 5) (Pelegrí, Font, & Palol, 2011).

Estudios de bombas centrífugas en CFD

El software CFD provee una amplia variedad de información de las bombas centrífugas incluyendo caudales, presiones y componentes para mejorar el diseño de la bomba entera, por ejemplo, manejar cargas, fuerzas del impulsor más precisas, cojinetes mejor equipados (Dorshch, 2007). La Figura 6 es el resultado de una simulación de una bomba centrífuga, las flechas en colores representan las velocidades del fluido que pasa a través de la bomba en pies/segundo.

Shah hace una revisión en la literatura sobre el tratamiento de las bombas centrífugas y reconoce que el análisis del flujo que pasa a través de ella es una tarea difícil ya que requiere un análisis crítico de un flujo altamente complejo puesto que dicho flujo es turbulento y tiene una curvatura de paso de flujo rápidamente cambiante. Debido a esto el enfoque CFD ha sido ampliamente utilizado como herramienta de simulación numérica para la predicción del desempeño de las bombas (SHAH, Jain, & Patel R N, 2013).

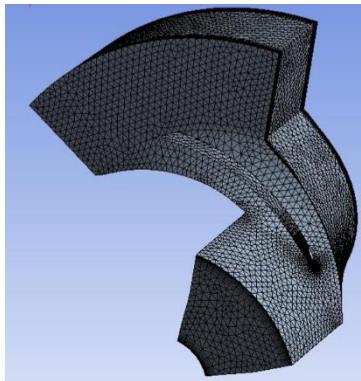


Figura 5 Estudio de una sección de una bomba centrífuga mediante CFD. Fuente: ANSYS®.

Wang (Wang, Fanyu, & Bai, 2017) diseña, mediante simulación CFD un tipo de impulsor especial con cuchillas curvadas hacia adelante para la condición de trabajo como turbina y el método para determinar el ángulo de entrada. Esto debido a que los propulsores centrífugos convencionales de palas curvadas hacia atrás no coinciden eficazmente con el funcionamiento de la turbina, el rendimiento de la bomba como turbina (PAT) no era usualmente lo ideal. Wang obtiene la fórmula de relación entre la constante de la voluta, el ángulo de envoltura y la dimensión geométrica de la entrada de la voluta. Anotando que su

clase de impulsor especial con las láminas delanteras-curvadas se diseñó con éxito para el PAT (Wang, Fanyu, & Bai, 2017).

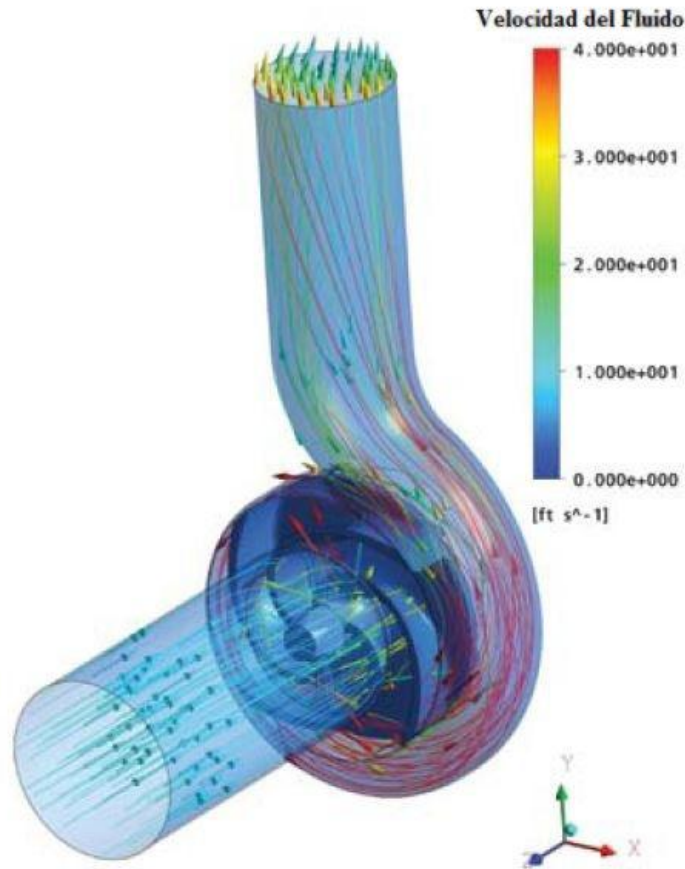


Figura 6 Simulación de una bomba centrífuga mediante CFD. Fuente: (Dorshch, 2007).

Chao (Chao & Luo, 2016) analiza la inestabilidad de los flujos de separación en los espacios laterales de las bombas centrífugas, así como los de la envoltura de la voluta y en impulsor; esta inestabilidad puede causar ruido y vibraciones. Chao realiza simulaciones numéricas para predecir los flujos inestables. Sus resultados evidenciaron que una variación de la holgura axial afecta las características de la presión en cada dominio del flujo en diferentes grados (Chao & Luo, 2016).

Liu (Liu, Dai, Ding, & M, 2014) estudia las influencias de las cuatro fuentes de dipolo de distintas superficies en una bomba centrífuga de succión simple, utilizando la simulación CFD, y sus resultados muestran que las fluctuaciones de presión en la superficie de la tubería de descarga y la superficie exterior del impulsor tienen poco efecto sobre los resultados de la simulación acústica. Las pulsaciones de presión en la superficie interna de la cavidad de la bomba juegan un papel importante en el flujo interno. Las distribuciones

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de presión sonora muestran que el nivel de presión acústica aumenta con el caudal creciente, con la mayor magnitud en la zona de la lengüeta (Liu, Dai, Ding, & M, 2014).

Chehhat (Chehheat & SI-Ameur, 2015) muestra el impacto del ángulo de salida de las palas en los parámetros de salida de la simulación de la bomba centrífuga, hace la claridad de que cualquier modificación en la geometría del impulsor tendría un impacto directo en los triángulos de velocidad de entrada o de salida del impulsor, lo que podría resultar en un cambio de rendimiento significativo. Su estudio concluye que existe un área de baja presión en el lado de succión de la entrada de la cuchilla a caudales bajos, a medida que aumenta el caudal, el área se acerca al centro del lado de succión de la cuchilla. La presión estática también aumenta en la sección de difusión de la salida de la voluta notablemente a un caudal pequeño mientras que la presión estática en el mismo lugar disminuye a mayor caudal. Pero la conclusión primordial del Chehhat fue que el ángulo de salida de la cuchilla tiene influencia en las características y rendimientos de la bomba, especialmente a altas velocidades de flujo. Observó un aumento en la cabeza, la eficiencia hidráulica y la potencia de salida con el aumento del ángulo de salida de la cuchilla (Chehheat & SI-Ameur, 2015).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo reporta la construcción de la curva característica de una bomba centrífuga a partir de la mecánica de fluidos computacional, desarrollada con el paquete de programas de ANSYS® V18.1 en el Laboratorio de Modelado del grupo de investigación en Materiales Avanzados y Energía del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (MATyER-ITM).

3.1. Desarrollo Geométrico

La geometría de la bomba se desarrolló basándose en la información suministrada por Rajendran & Puruchothaman. Los datos entregados por Rajendran & Puruchothaman permitieron la configuración del impulsor en la Vista CPD® así como su creación. Los datos ingresados en la parte condiciones de operación corresponde: A) Velocidad: 942 rpm; B) Caudal: 45 m³/h; C) Altura de cabeza: 10m. En la parte de geometría se varía: A) El diámetro de la punta se cambia de automática a usuario definido. b) La relación entre el espesor y el diámetro de la punta en 0.064 (Rajendran & Purushothaman, 2013). Una vez entregados los datos a la Vista CPD® como se muestra la Figura 7 se genera una geometría 2d equivalente a la bomba que se está estudiando. La Figura 8 **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** indica el significado de los bordes más importantes de la bomba recién creada:

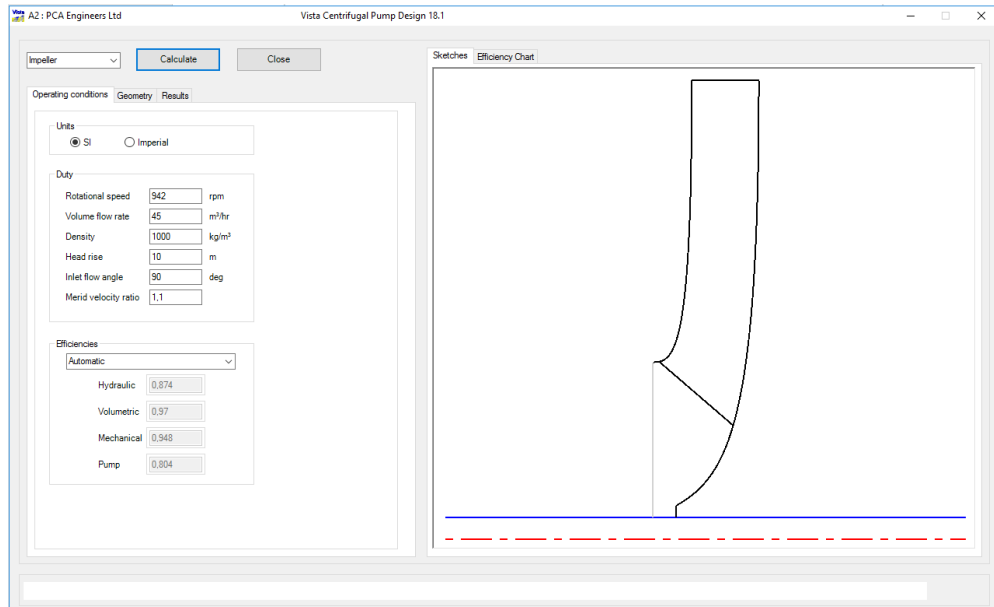


Figura 7 Contorno total de la VistaCPD®. Fuente: ANSYS®

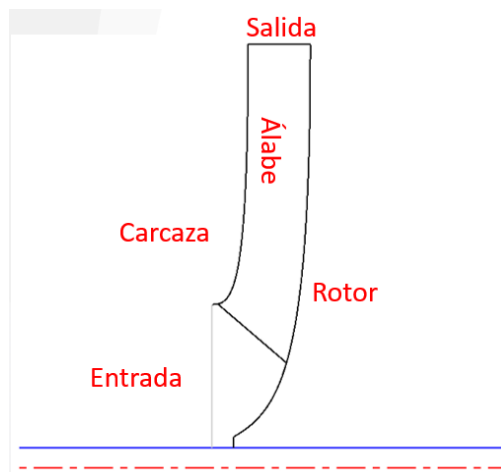


Figura 8 Elaboración de la geometría en 2D desde la herramienta VistaCPD®. Fuente: ANSYS®.

Una vez generada la geometría se traslada al módulo Bladegen®, la vía para trasladarla fue: Clic izquierdo sobre la fila 2 de la Vista CPD® (sobre Blade Design®); señalamos crear nuevo y este nos abre distintos módulos, uno de ellos es Bladegen®, tal como lo muestra la Figura 9.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

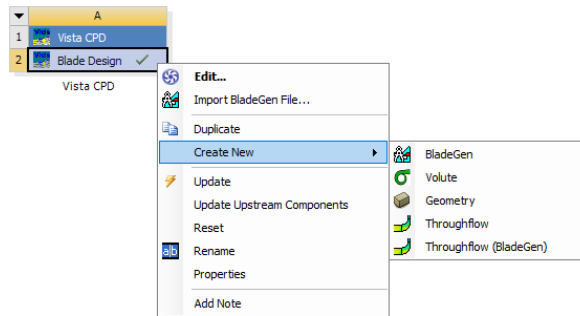




Figura 9 Transferencia de la Vista CPD® al módulo Bladegen®. Fuente: ANSYS®.

En este módulo se puede ver por primera vez la pala, así como el volumen a estudiar, de ahora en adelante llamado sistema de control de la bomba centrífuga en 3D, este se aprecia en la Figura 10.

Para ver el volumen de control y la pala, como se indica en la ilustración tres, se da clic en la parte inferior izquierda que dice sin réplica, este aparece con el ícono: . Luego se da clic a todas las réplicas, en el ícono ubicado al lado derecho . Una vez se crea el sistema de control, en este módulo se invierte la dirección de giro de las palas, para asimilar el modelo de geometría del referente conceptual en el que basamos esta simulación. Para esto se a herramientas, invertir rotación de giro tal y como se ejemplifica en la ilustración 5.

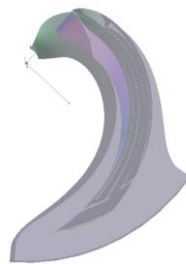


Figura 10 Pala vista desde el módulo Bladegen® así como el sistema a controlar. Fuente: ANSYS®.

Generado el sistema de control se traslada a Bladegen®, allí se invierte el giro de las palas. Así como se genera la vista 3D del sistema de control, la Figura 11.

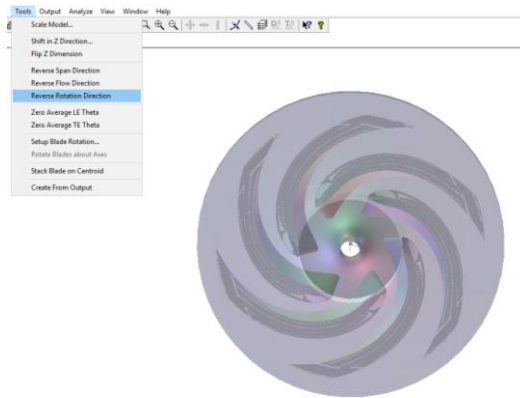


Figura 11 cambio en la dirección de las palas. Fuente: ANSYS ®.

Una vez establecido el diseño de la geometría, se transfirió al módulo DesignModeler®, generando un volumen de control en uno de los álabes (Figura 12), por lo que hay que crear un patrón de repetición circular alrededor (Figura 13) del plano XY y estableciendo en número de copias en 5 para asemejar dicho volumen con el propuesto por el referente estudiado.

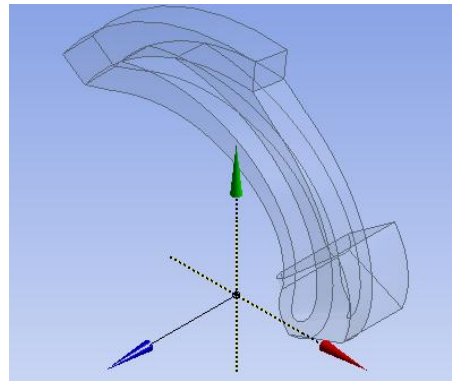


Figura 12 Volúmen de control en uno de los álabes. Fuente: ANSYS ®.

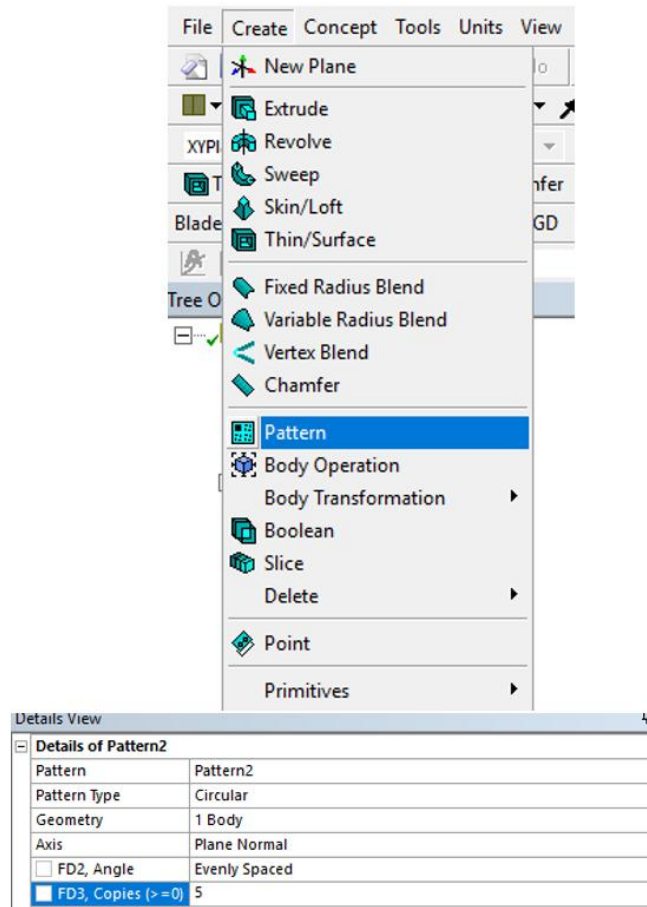


Figura 13 Creación del patrón de repetición en el álabe. Fuente: ANSYS ®.

Resulta necesario ocultar la parte de los álabes debido a que el centro de estudio son los fenómenos en el comportamiento del fluido cuando pasa alrededor del impulsor desde la entrada hasta la lengua de la salida.

En la Figura 14 se observa la geometría una vez haya pasado por el este módulo.

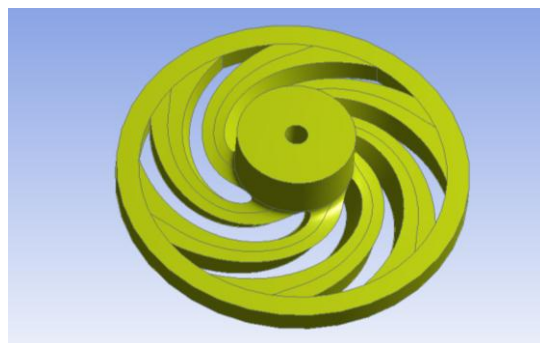


Figura 14 Volumen de control del impulsor completo sin álabes. Fuente: ANSYS ®.

3.2. Mallado de geometría

Ya obtenida la geometría se procedió a realizar el mallado en el módulo Meshing®, al diseñar la bomba centrífuga a través de la vista CPD®, en el módulo Meshing® se genera un mallado por defecto con la característica de poseer 695421 número de elementos tetraédricos, así mismo que le otorga una inflación en la salida y la entrada con un espesor inicial de 0,3mm aumentando con una rata de 1,2 repitiéndose 10 veces y una calidad ortogonal promedio de 0,70939. Este mallado se puede ver en la Figura 15

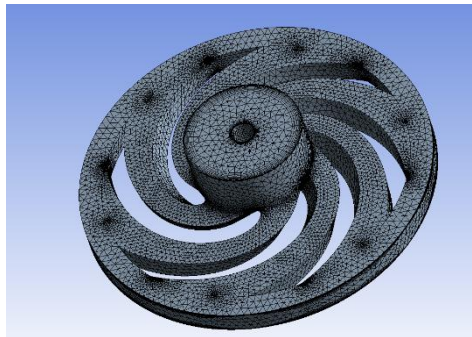


Figura 15 Mallado correspondiente al estudio creado por defecto via Meshing®. Fuente: ANSYS®.

3.2.1. Independencia de malla

En el estudio de independencia de malla se ensayaron varias mallas con diferente cantidad de elementos para definir la convergencia de los resultados de simulación comparados con la malla generada automáticamente por el software. Se monitoreó la presión en la salida del impulsor, variable de interés en el presente artículo.

Table of Design Points										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Name	P1 - Mesh Min Size	P2 - Mesh Proximity Min Size	P3 - Mesh Max Face Size	P4 - Mesh Max Tet Size	P5 - Mesh Elements	P6 - Cabeza	Retain	Retained Data	Note
2	Units	m	m	m	m		m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	DP 0 (Current)	8,5084E-05	8,5084E-05	0,0085084	0,017017	7,682E+05	9,4204	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	DP 1	4,5E-05	4,5E-05	0,0045	0,009	8,5128E+05	9,6466	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	DP 2	2,1E-05	2,1E-05	0,0021	0,0042	2,3879E+06	9,461	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	DP 3	1E-05	1E-05	0,001	0,002	1,1539E+07	9,4434	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 16 Estudio de independencia de malla por medio de parámetros. Fuente: ANSYS®.

En el estudio de independencia de malla, se observó que el resultado de la cabeza era constante desde la primera malla realizada (695421 elementos) hasta la última (11539000 elementos) y que finalizaba exitosamente la simulación con un número de 100 iteraciones, pero el error residual de 10^{-4} no lo hacía por lo que cambió el número de iteraciones de 100 a 1000 con los cuales los resultados convergían aproximadamente con 250 interacciones. En el Gráfico 1 se describen los puntos de distintas mallas, y, tomando como argumento

teórico la malla con más elementos, se establece el porcentaje de error, obteniendo un error de menos del 1% para la malla que Meshing® establece por defecto y que tiene menor densidad de elementos lo que redujo la capacidad de cómputo al momento de realizar la simulación.

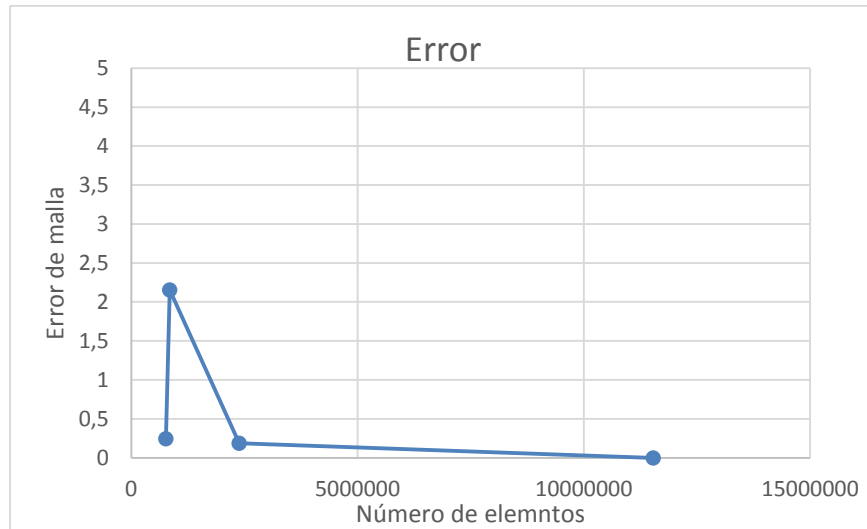


Gráfico 1 Error del estudio de independencia de malla. . Fuente: ANSYS®.

Una vez validado el estudio de malla, se ejecutó la simulación por medio a través de CFX®

3.3. Simulación en CFX

3.3.1. Configuración de la simulación

A través del módulo CFX® y gracias a la herramienta Turbo Mode (Figura 17), se configura la dirección, velocidad de rotación (Figura 18; Figura 19); y posteriormente se asignó como modelo de turbulencia k-ε (Sección 3.3.1.1). En las condiciones de frontera, se ingresó la presión manométrica de referencia en cero, el fluido como agua (Figura 20).

Dado que Rajendran & Puruchothaman implementan un caudal de 0.0125m³/s, se ingresó este parámetro para la primera simulación y se hizo la conversión a m³/h. Ver Figura 20.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

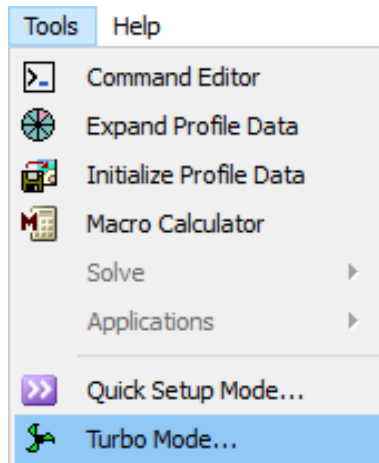


Figura 17 Herramienta Turbo Mode de CFX. Fuente: ANSYS ®.

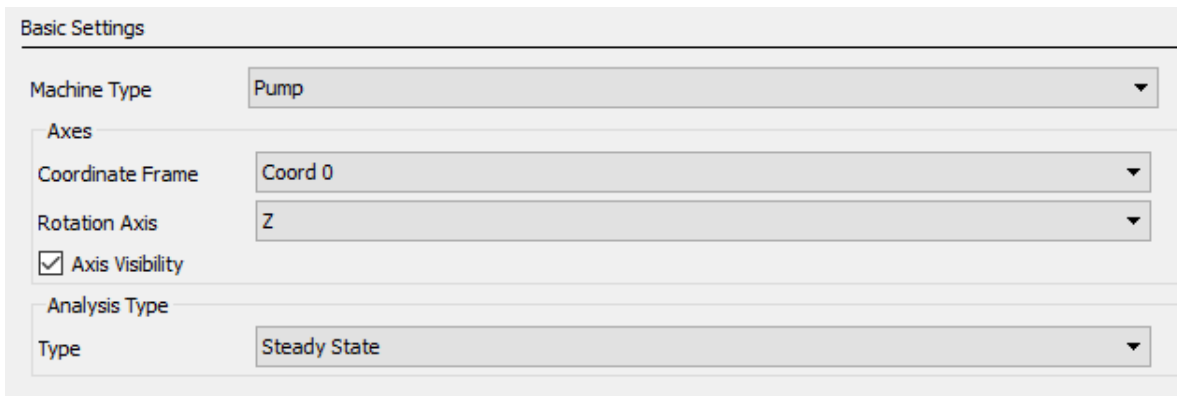


Figura 18 Configuración de la bomba. Fuente: ANSYS ®.

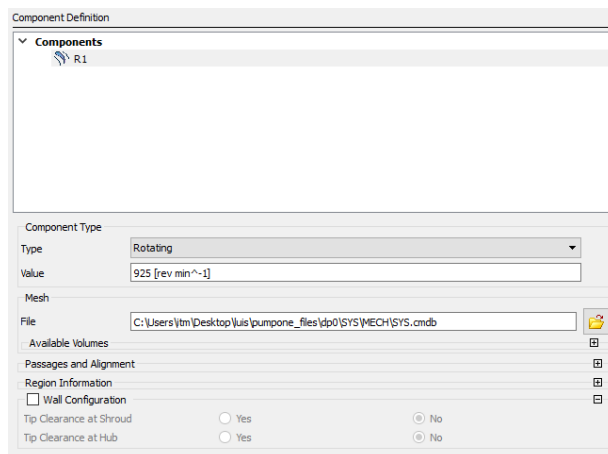


Figura 19 Configuración de la velocidad del rotor. Fuente: ANSYS ®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

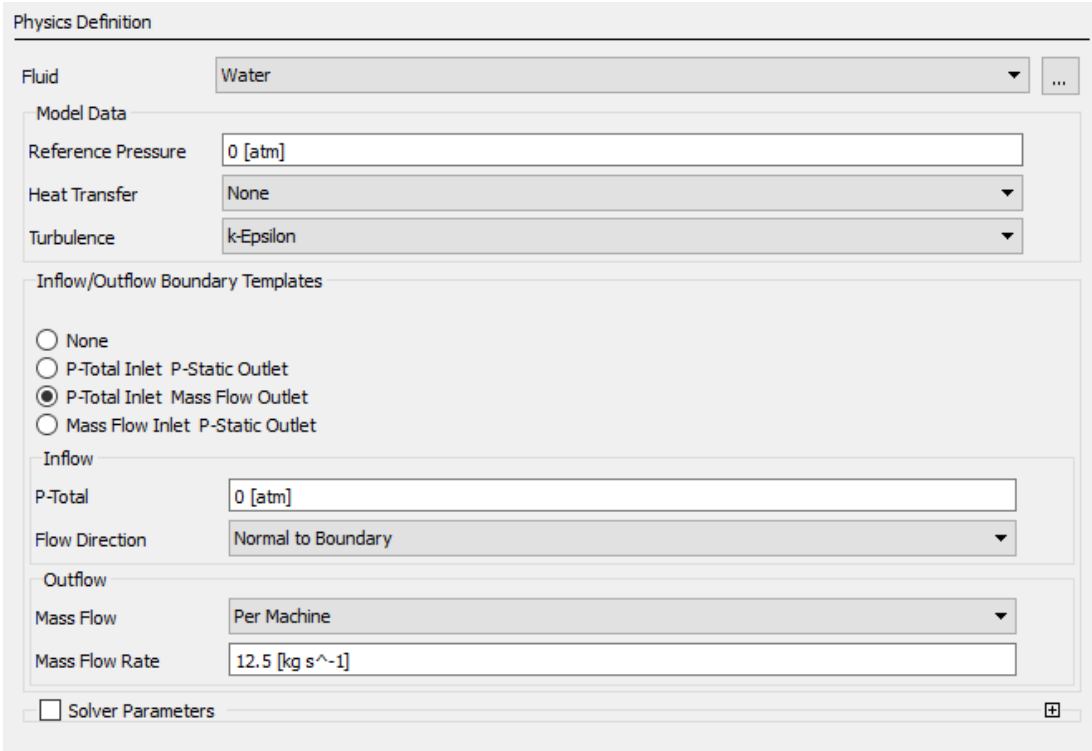


Figura 20 Condiciones del sistema a analizar. Fuente: ANSYS®.

En la pestaña Solver Control se establecen los controles de convergencia en una iteración como mínimo y 1000 iteraciones como máximo; una iteración es cuando se repite un proceso, en este caso la solución de ecuaciones vía simulación, para llegar a un objetivo estipulado; tienen como característica que el punto de salida de una es el punto de entrada de otra. Para esta simulación se tiene el parámetro que cuando los factores de convergencia lleguen a 10^{-4} de error, la simulación termine con éxito y entregue resultados.

3.3.1.1. Modelo de turbulencia k-ε

El modelo de turbulencia k-ε es uno de los modelos de turbulencia más utilizado en el análisis computacional de fluidos (CFD), ha sido utilizado en un gran número de aplicaciones tanto en sistemas hidráulicos como aerodinámicos; este modelo presenta: a) La disipación de turbulencia (ε); b) la turbulencia en la energía cinética (k); tiene como inconsistencia que la tasa de disipación es alterada empíricamente por naturaleza (Chen, 2014).

Se compone por las ecuaciones:

$$\rho u k_x + \rho v k_y - [(\mu_t/\sigma_k) k_x]_x - [(\mu_t/\sigma_k) k_y]_y = \rho (P_r - \epsilon)$$

Ecuación 1 Turbulencia en la energía cinética

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

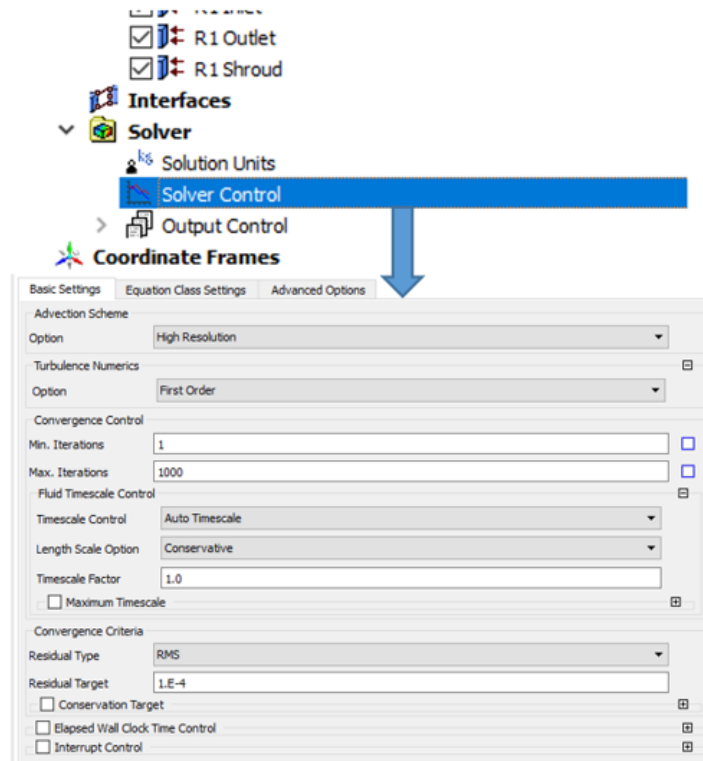


Figura 21 Configuración de los factores de convergencia. Fuente: ANSYS®.

Donde

ρ es densidad del fluido

$u \wedge v$ son vectores de velocidad en $x \wedge y$

μ es la viscosidad del fluido

$P_r \wedge \epsilon$ representan la producción de tasa y la disipación de tasa de la turbulencia en la energía cinética (k)

σ_k es una constante del modelo

μ_t es la turbulencia en la escala de velocidad

$$\rho u \epsilon_x + \rho v \epsilon_y - [(\mu_t/\sigma_\epsilon) \epsilon_x]_x - [(\mu_t/\sigma_\epsilon) \epsilon_y]_y = \rho(C_1 P_r \epsilon/k - C_2 \epsilon^2/k + C_3 P_r^2/k)$$

Ecuación 2 Disipación de la turbulencia

Donde C_1 , C_2 y C_3 son constantes del flujo turbulento

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3.2. CFX solver

Se corrieron 17 simulaciones en una WorkStation con un procesador Intel(R) Xenon(R) X5650 de 2.66GHz de velocidad de procesamiento, 10 GB de RAM, una aceleradora gráfica NVIDIA GeForce GTX 560 con una GB de RAM y 6 núcleos trabajando en paralelo para resolver las ecuaciones del modelo seleccionado en cada uno de los elementos de la malla y reducir el tiempo en la simulación.

3.3.3. CFX Post

3.4. Después de que el proceso de simulación termina se procede a realizar la interpretación de los resultados en el módulo CFX post; inicialmente en la sección de calculators utilizamos la herramienta function calculator () para calcular la presión a la salida del impulsor y copiar la función que nos arroja en programa (Figura 22

La geometría de la bomba se desarrolló basándose en la información suministrada por Rajendran & Puruchothaman. Los datos entregados por Rajendran & Puruchothaman permitieron la configuración del impulsor en la Vista CPD® así como su creación. Los datos ingresados en la parte condiciones de operación corresponde: A) Velocidad: 942 rpm; B) Caudal: 45 m³/h; C) Altura de cabeza: 10m. En la parte de geometría se varía: A) El diámetro de la punta se cambia de automática a usuario definido. b) La relación entre el espesor y el diámetro de la punta en 0.064. Una vez entregados los datos a la Vista CPD® como se muestra la Figura 7 se genera una geometría 2d equivalente a la bomba que se está estudiando. La Figura 8 **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** indica el significado de los bordes más importantes de la bomba recién creada:

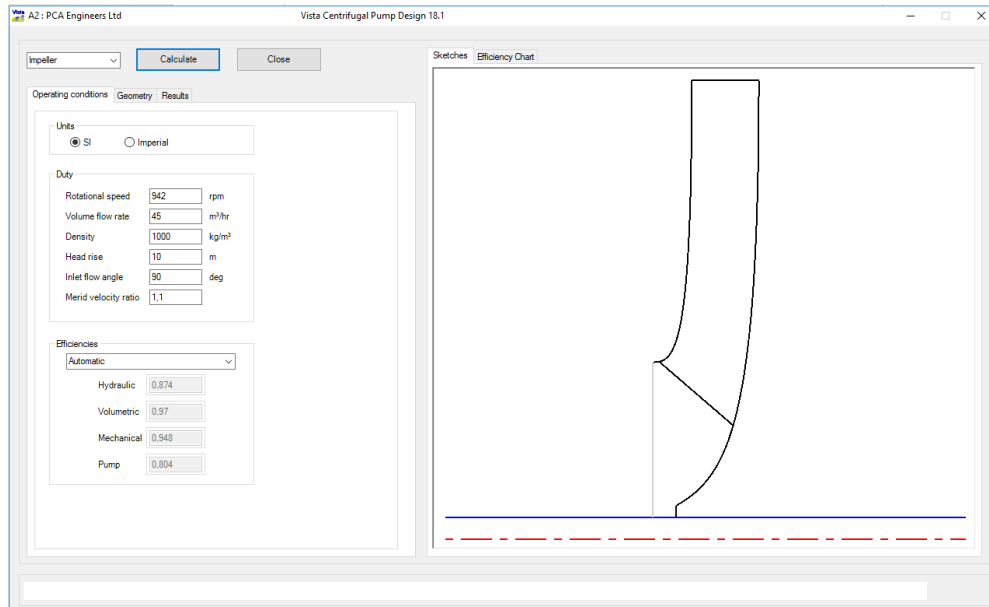


Figura 7 Contorno total de la VistaCPD®. Fuente: ANSYS®).

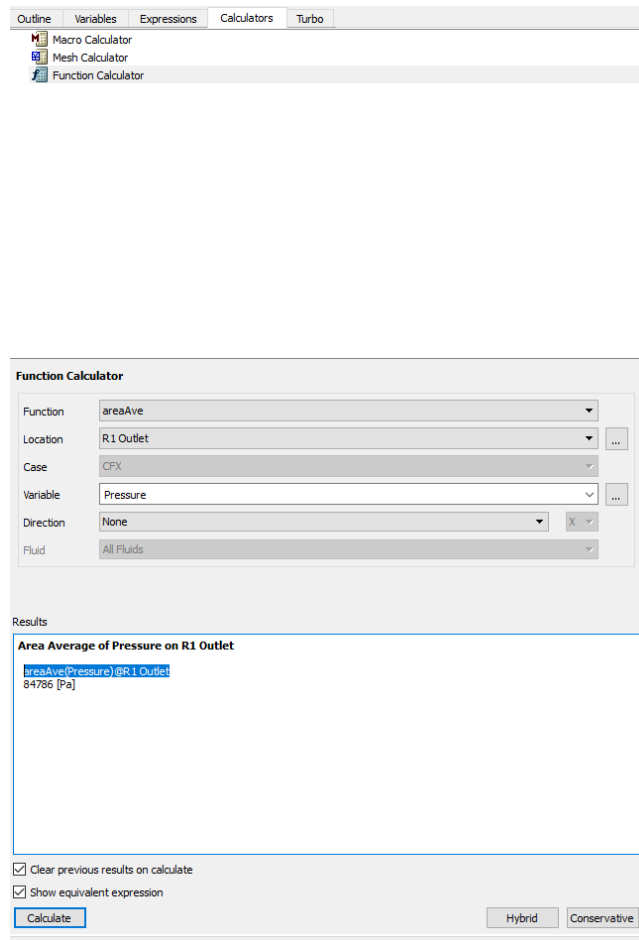


Figura 22 Cálculo de la presión a la salida del impulsor. Fuente: ANSYS®.

Luego de tener la función de presión, en la pestaña expressions con clic derecho creamos una nueva expresión en la cual se calculará la cabeza de manera automática ingresando la ecuación $h = \frac{P}{\gamma}$ siendo γ el peso específico del fluido, en este caso agua y equivale a 9800 N/m³ (Figura 23).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

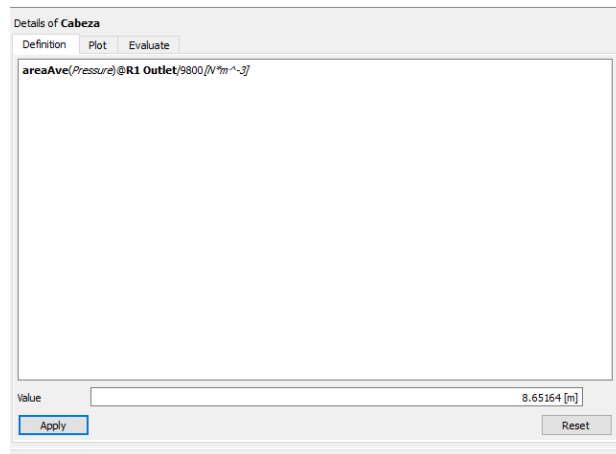




Figura 23 Calculo de la cabeza de la bomba. Fuente: ANSYS ®.

Luego seleccionamos el ícono  y realizamos un trazado de líneas de corriente para observar el comportamiento del fluido en el impulsor y verificar que este no atraviesa ninguno de los álabes; en la pestaña geometry se establece que trazado inicia en la entrada de flujo y que posee 25 puntos de dispersión y en la pestaña color se cambia el modo a variable y se establece como presión la variable a analizar(Figura 24).

Para ver una animación del fluido pasando a través del impulsor, se selecciona el ícono  y se reduce la velocidad del vídeo para tener mejor visualización del fenómeno.

Luego de validar el punto del estudio de Rajendran & Puruchothaman se procedió a realizar la curva característica similar a la de Chehheat & SI-Ameur; se duplica el módulo CFX y se cambia el flujo másico a otro punto que se desee evaluar.

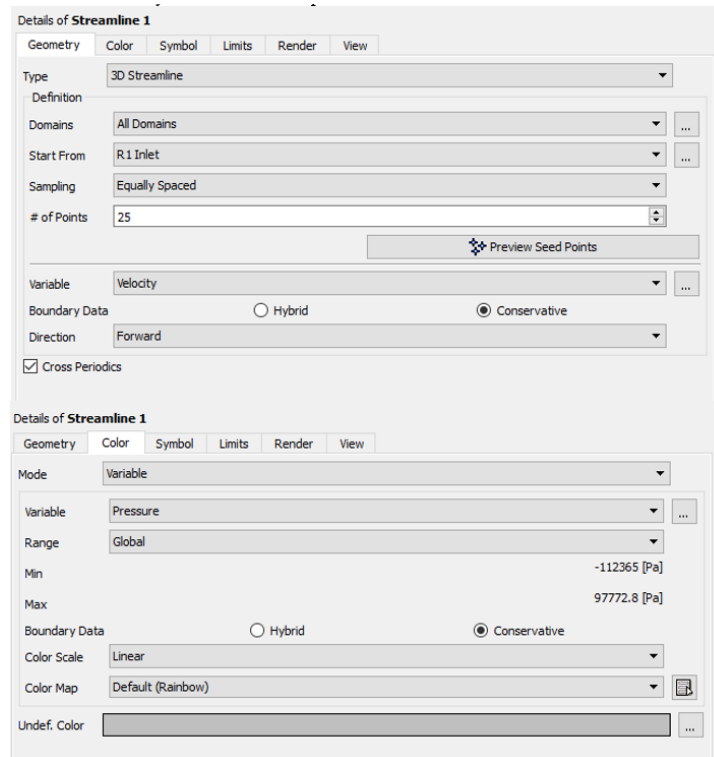


Figura 24 Configuración de líneas de corriente. Fuente: ANSYS ®.

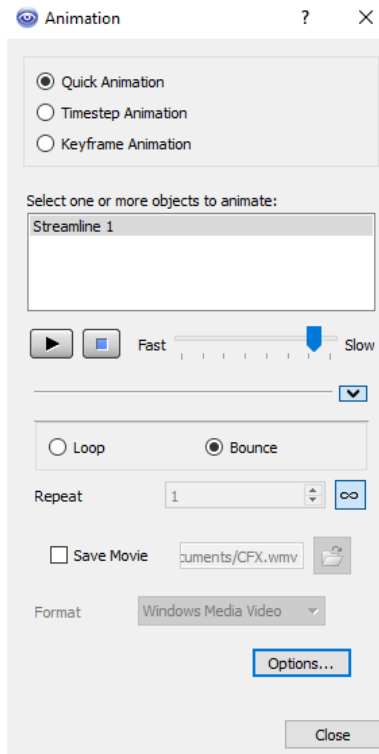


Figura 25 Animación del flujo que pasa a través del impulsor. Fuente: ANSYS ®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

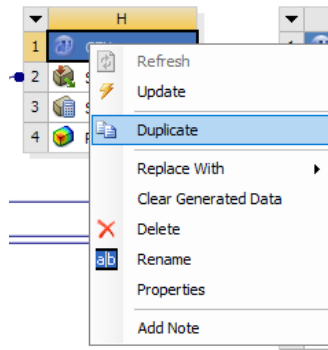


Figura 26 Duplicado del módulo CFX. Fuente: ANSYS ®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se valida el punto de cabeza de 9.25m cuando tiene caudal de 12.5 kg/s propuestos por Rajendran & Purushothaman obteniendo una cabeza de 8.65m (Rajendran & Purushothaman, 2013). Tomando al referente como valor teórico y el nuestro como valor experimental tenemos un error teórico del 6.48%, debido a la cercanía al punto simulado por el autor, se procede a buscar distintos puntos que formen la curva característica con flujos máxicos de 0.25, 0.5, 1, 5 incrementando por unidad hasta 16 [kg/s]; además se observa en el Gráfico 2 que la curva característica obtenida tiene como la tendencia de todas las curvas características de las bombas centrífugas de tipo estable, en donde las variaciones del flujo son inversamente proporcionales a las de la cabeza, es decir, a medida que aumenta el caudal, la altura de la cabeza es menor.

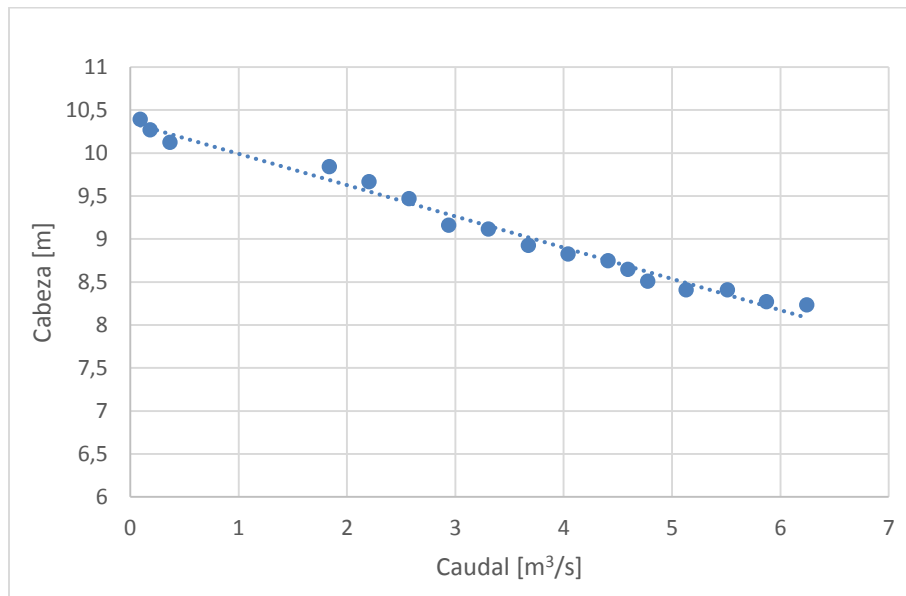


Gráfico 2 Curva característica obtenida en el estudio.

En la Figura 27 y la Figura 28 se observan los contornos de presión del flujo a través del impulsor, la primera se muestran las líneas de corriente de flujo y en la segunda se describe el contorno de la presión en el perfil 2D, en estas se puede observar que el fluido que atraviesa el impulsor en ningún momento atraviesa la sección donde están ubicados los álabes.

En las líneas que representa la presión de la Figura 27 en la entrada la presión, indicada de color verde es baja, a medida que el fluido avanza la presión cambia, por eso la zona de la

salida tiende a rojo, la variación de la presión va desde -1034.36 [Pa] en la entrada hasta 84786 [Pa] a la salida.

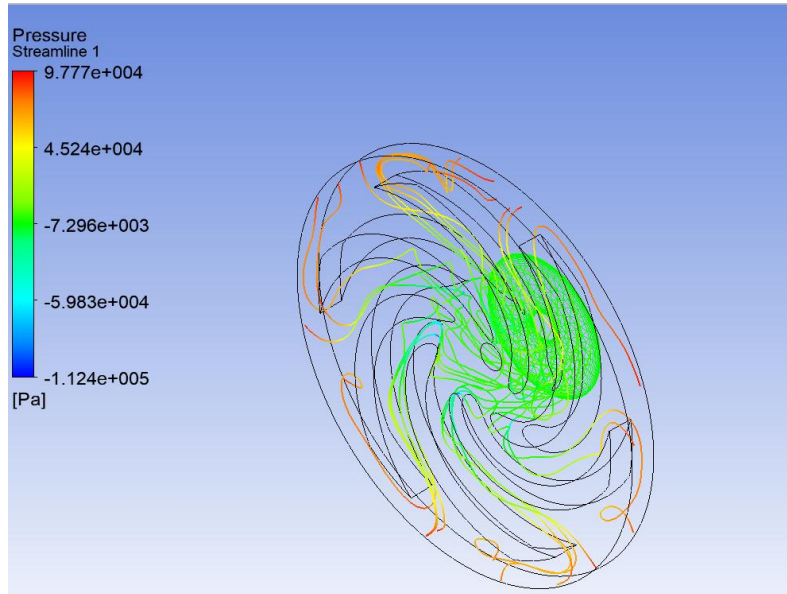


Figura 27 Líneas de flujo afectado por la presión a través del impulsor. Fuente: ANSYS®.

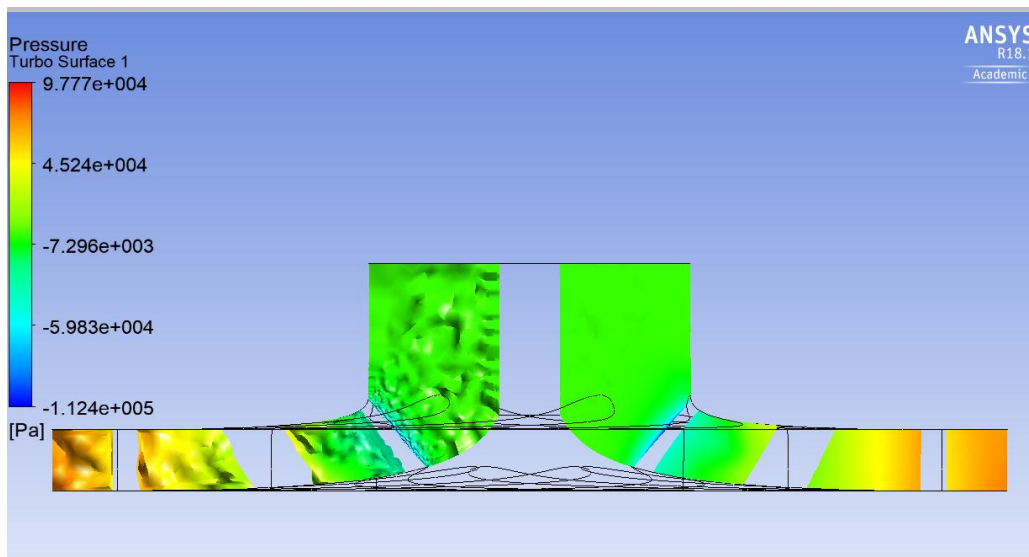


Figura 28 Contorno de presión en el perfil del álabe. Fuente: Ansys®.

Se debe considerar que la velocidad de 925 rpm es relativamente baja en relación con las velocidades que han operado las distintas investigaciones consideradas en la presente monografía, por eso es justificable, de manera directa la altura indicada por la cabeza de la bomba simulada, puesto que la curva debería tener una directa relación con el diámetro del impulsor, la velocidad y la voluta.

En la Figura 29 se observan en las líneas de flujo la variación de la velocidad a través del impulsor; a pesar que la bomba no tiene carga se puede observar que a medida que el fluido avanza por el impulsor, la velocidad disminuye siendo esta inversamente proporcional a la presión que atraviesa el fluido.

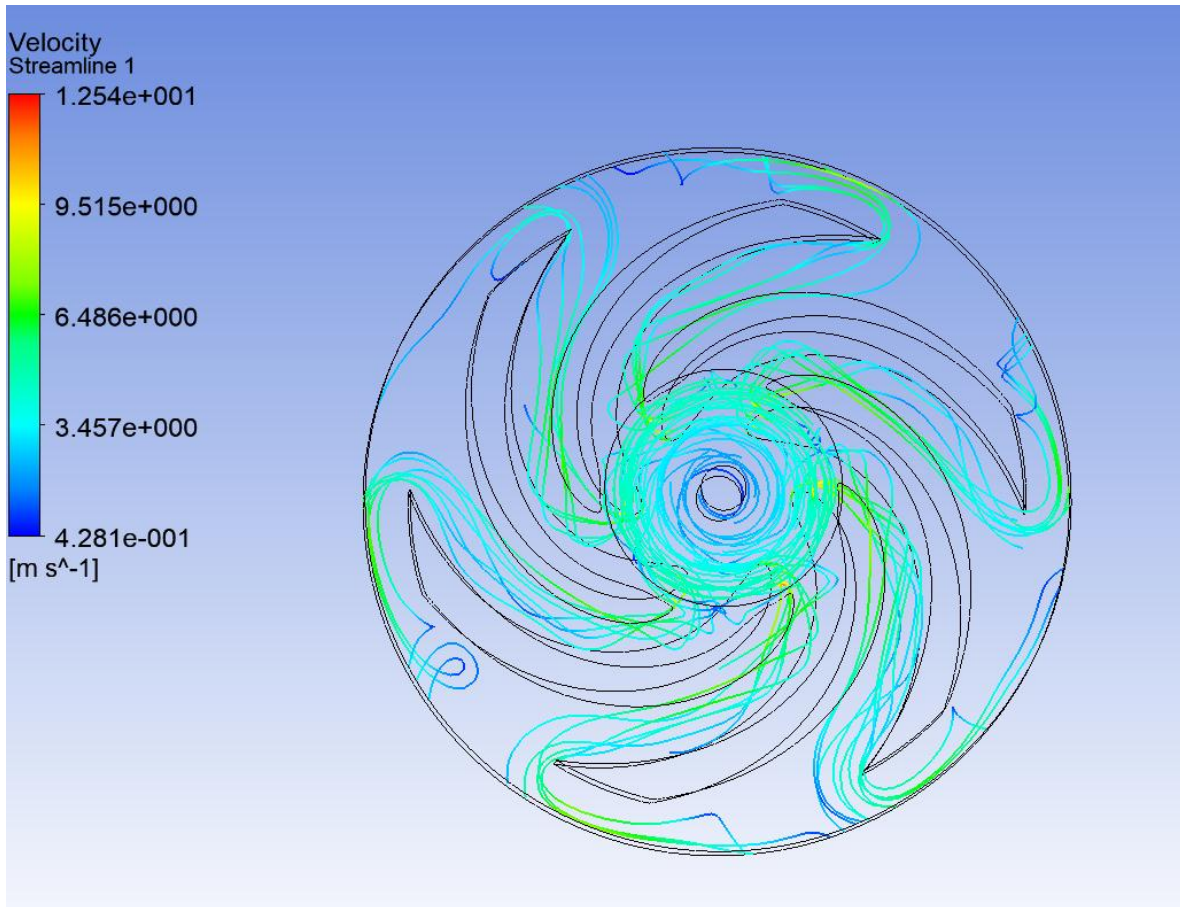


Figura 29 Líneas de flujo afectado por la velocidad a través del impulsor. Fuente: Ansys®

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Al establecer una comparación entre los resultados de simulación de Rajendran & Purushothaman y los encontrados en el presente trabajo se puede concluir que se logró el objetivo de hallar la cabeza, y a partir de ésta se obtuvo una curva característica de la bomba que se simuló. En la Tabla 1 Comparación de los resultados del referente con el resultado obtenido se comparan los resultados del referente con los obtenidos:

Variable	Referente	Propios
Altura de cabeza	9.25m	8.65m
Caudal	0.0125m ³ /s	0.0125 m ³ /s
Diámetro de entrada	150mm	150mm
Diámetro de salida	280mm	280mm
Velocidad	925rpm	925rpm
Espesor de álabe	20mm	20mm
Número de álabes	6	6

Tabla 1 Comparación de los resultados del referente con el resultado obtenido

Mediante las herramientas computacionales se pueden construir numéricamente curvas características por lo que puede resultar viable el uso de esta herramienta potencial para disminuir costos y tiempo en la elaboración de estas.

Se consultó en las bases de datos del Instituto Tecnológico Metropolitano y se encontraron 19 referentes de los cuales el principal para el desarrollo del trabajo realizado es “Analysis of a centrifugal pump impeller using ANSYS-CFX” en el cual se abordan especificaciones de la creación de la geometría y los resultados de simulación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La herramienta VistaCPD fue una gran ayuda para la creación de la geometría, pero tiene como falencia que no se pueden abordar puntos específicos de esta, por ello el uso de BladeGen fue necesario para finalizar los detalles que VistaCPD no entrega.

Al momento de crear la malla de la geometría no fue necesario utilizar un gran número de elementos ya que con 695421 elementos fue suficiente para crear una malla con buena calidad ortogonal y que esta entregara resultados medianamente correctos.

Al momento de hacer la configuración correcta del modelo y de las variables estáticas de la bomba, se pudo ejecutar sin problemas las simulaciones utilizando toda la capacidad de cómputo disponible en el equipo y finalmente construir la curva característica de la bomba y hallar la potencia y la eficiencia de esta.

El diseño de la geometría pudo haber sido mucho más exacto si se hubiera creado con BladeGen pero la falta de conocimiento sobre la herramienta impidió el uso de esta.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Alvarez C, A., Gonzales S, H., & Alvarez G, A. (2004). *Nociones básicas de bombas y sistemas de bombeos*. Medellín : Universidad Nacional .
- Chao, L. W., & Luo, Y. (2016). numerical investigation of pressure fluctuation characteristics in a centrifugal pump with variable axial clearance. *Hindawaj*, 1(1), 1-13.
- Chehheat, A., & SI-Ameur, M. (2015). *blade exit angle impact on turbulent fluid flow and performance of centrifugal pump usig CFD*. Khenchela: Abbes laghrour university.
- Chen, Y.-S. (13 de Agosto de 2014). Computation of turbulent flow using an extended turbulence closure model. *ResearchGate*, 31.
- Dorshch, G. (2007). CFD simulations say goodbye to physical prototypes. *machine design*, 1(1), 118-121.
- Fernandez, P. (2010). *Bombas centrifugas y volumétricas*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Franzini, j. (1999). *Mecánica de fluidos*. Madrid: Mc Graw gill.
- Fuchbcher, E., & Kaemer, M. (1954). *Bombas manual para escuela de ingenieros*. Barcelona: Labor S.A.
- Jafazadeh, B., Hajari, A., Alisshahi, M., & Akabari, M. (2011). The flow simulation of a low-specific-speed centrifugal pump. *Applied Mathematical Modeling*, 242-249.
- León Simanca, P., & Agudelo Florez, S. (2002). *sistemas de medición manual y automática por computador para el banco de bombas centrifugas del laboratorio de mecanica de fluido de la universidad de antioquia*. Medellín.: Universidad de Antioquia .
- Liu, H., Dai, H., Ding, & M, T. (2014). Numerical and experimental studies of hydraulic noise induced by surface dipole sources in a centrifugal pump. *journal of hydrodynamics*, 1(28), 43-52.
- Pelegrí, M., Font, M., & Palol, J. (2011). Proceso de diseño de bombas centrífugas. *Tecnologías del agua*, 1(331), 54-58.
- Rajendran, S., & Purushothaman, K. (4 de Enero de 2013). Analysis of a centrifugal pump impeller using ANSYS-CFX. *ResearchGate*, 6.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Sánchez Vázquez , J. (12 de 08 de 2017). *E-rediign*. Obtenido de SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA EN PARALELO DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES EN FLUJOS CON CAPA LÍMITE DESPRENDIDA. APLICACIONES EN INSTALACIONES DEPORTIVAS CON GRADAS CUBIERTAS: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>

Sarrate, L., & Albercht, K. (1996). *Hidráulica, motores hidráulicos, bombas*. Barcelona: Labor.

SHAH, S. R., Jain, S. V., & Patel R N, L. V. (2013). cfd for centrifugal pumps: a review of estate-of-the art. *Procedia Engineering*(51), 715-720.

Universidad de Valladolid. (s.f.). *Curvas características de una bomba*. Obtenido de https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/455/42623/1/Documento4.pdf

W, Pumpen Intelligenz. (2005). *principios fundamentales de las tecnología de las bombas centrífugas*. Dortmund: Wilo Se.

Wang, T., Fanyu, K. X., & Bai, Y. W. (2017). the metod for determining blade inlet angle for special impeller using in turbine mode of centrifugal pump as turbine. *Renewable energy*, 1(109), 518-528.

Wilo Pumpen Intelligenz Ltd. (2005). *principios fundamentales de las tecnología de las bombas centrífugas*. Dortmund: Wilo Se.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Luis Fernando Acevedo

 Alexander Meza

FIRMA ASESOR [Signature]

FECHA ENTREGA: 15/11/2017 segunda entrega de informe final corregido según evaluador

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____