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

# Simulación hidrodinámica de una Turbina tipo hélice de 2kW de potencia

Juan Fernando Zapata Cuartas

Ingeniería Electromecánica

Jorge Andrés Sierra del Río

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**2 de Marzo de 2017**

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

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

En el presente proyecto se da a conocer el procedimiento utilizado para realizar una simulación hidrodinámica de una turbina tipo hélice de 2kW de potencia y 3 álabes, aun salto de 4m y un caudal de  $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua, con el fin de validar los valores teóricos, que han sido calculados con anterioridad y de este modo determinar la eficiencia de la turbina y recomendaciones de mejora.

El proyecto se realiza en el grupo de Modelado Avanzado y diseño digital-Materiales Avanzados y Energía (MATyER-CADD) del ITM en conjunto con el Grupo de Energías Alternativas de la Universidad de Antioquia (GEA-UdeA). El proceso de simulación numérica se realiza con el software ANSYS CFX 16.0®.

Para el desarrollo del proyecto fue necesario realizar la simulación para 2 geometrías diferentes, con el fin de conocer el valor a condiciones reales de diseño, y conocer el valor más cercano a partir de un diseño teórico, el cual permite una mayor exactitud en el análisis, a partir del cálculo de las ecuaciones de Navier-Stokes. Para el primer diseño se encuentra un error del 20% aproximadamente, para el valor del torque generado por la simulación respecto al calculado teóricamente. Para el segundo se encuentra un error del 5% aproximadamente, siendo mucho más cercano al valor teórico, ya que la geometría permite obtener un mejor análisis por su diseño.

En conclusión, se encuentra que el proyecto es coherente y los resultados son satisfactorios. Queda por validar el modelo numérico obtenido, respecto al funcionamiento real (CFD vs Experimental)

***Palabras claves.***

Simulación CFD, Turbo maquinaria, turbina – hélice, Ansys CFX, Kaplan.

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

## RECONOCIMIENTOS

---

“Primero agradecer a Dios por regalarme la vida y permitirme alcanzar un logro más, por darme salud, una familia y por ponerme en esta gran institución para formarme como un profesional integral, con visión para ofrecer opciones de mejora y desarrollo social”

“Agradecimientos a la facultad de ingeniería del Instituto Tecnológico Metropolitano, por su gran labor con los estudiantes”

“Agradecimientos a los profesores Jorge Sierra y Diego Hincapié por su apoyo y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto, por su paciencia, comprensión y compromiso educativo, para impulsar y formar profesionales competentes para la sociedad”

“Agradecimientos a mis padres por su lucha constante, por su paciencia y valores inculcados, por impulsarme a ser mejor cada día, a alcanzar mis metas y sueños, por ayudarme con sus consejos y por guiarme por el camino que voy, para ser una persona de bien para la sociedad”

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ACRÓNIMOS

---

**GEA** Grupo de energías alternativas.

**MATyER-CADD** grupo de Modelado Avanzado y diseño digital-Materiales Avanzados y Energía.

**CFD** Computaional Fluid Dynamic.

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

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	14
3. METODOLOGÍA.....	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	66
REFERENCIAS .....	68
APÉNDICE.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** *Potencia de la turbina.*

**Figura 2.** *Ábaco para la selección del tipo de turbina*

**Figura 3.** *Turbinas de reacción. a) Turbina Founeyron, b) Turbina Heuschel-Jonoval, c) Turbina Francis.*

**Figura 4.** *Turbinas de acción.*

**Figura 5.** *Clasificación de acuerdo a la entrada de agua. a) Turbina Axial, b) Turbina Radial, c) Turbina Tangencial*

**Figura 6.** *Turbinas Kaplan.*

**Figura 7.** *Partes de la turbina Hélice.*

**Figura 8.** *Rodete de la turbina hélice.*

**Figura 9.** *Principio de funcionamiento.*

**Figura 10.** *Ángulo de ataque.*

**Figura 11.** *Dimensiones principales del rodete.*

**Figura 12.** *Valores de dimensiones de la turbina hélice.*

**Figura 13.** *Dimensiones principales de la turbina hélice.*

**Figura 14.** *Dimensiones principales de la turbina hélice.*

**Figura 15.** *Fuerzas que actúan sobre el ala portante.*

**Figura 16.** *Curvas polares para los diferentes perfiles.*

**Figura 17.** *Perfil del álabe.*

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Figura 18.** Conjunto de álabes en una corriente de flujo.

**Figura 19.** Triángulo de velocidades en el álabe.

**Figura 20.** Geometría ideal.

**Figura 21.** Geometría Original.

**Figura 22.** Malla geometría original.

**Figura 23.** Malla geometría original.

**Figura 24.** Rodete de la turbina tipo hélice.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## LISTA DE ECUACIONES

***Ecuación 1.*** Potencia de la turbina.

***Ecuación 2.*** Velocidad específica de una turbina.

***Ecuación 3.*** El ángulo de ataque de una turbina.

***Ecuación 3.*** Componente tangencial de la velocidad.

***Ecuación 4.*** Transformación de la energía para pequeñas centrales hidroeléctricas. Ecuación de Euler.

***Ecuación 5.*** Transformación de la energía.

***Ecuación 6.*** Potencia absorbida por el fluido.

***Ecuación 7.*** Potencia transmitida por el fluido al generador.

***Ecuación 8.*** Eficiencia de la turbina.

***Ecuación 9.*** Potencia eléctrica generada por la turbina.

***Ecuación 10.*** Velocidad específica de la turbina.

***Ecuación 11.*** Diámetro externo del cubo.

***Ecuación 12.*** Diámetro interno del cubo.

***Ecuación 13.*** Diámetro del rodete.

***Ecuación 14.*** Longitud del rodete.

***Ecuación 15.*** Coeficiente de velocidad tangencial.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

***Ecuación 16.*** *Diámetro externo del cubo.*

***Ecuación 17.*** *Diámetro interno del cubo.*

***Ecuación 18.*** *Longitud del rodete.*

***Ecuación 19.*** *Diámetro externo del cubo.*

***Ecuación 20.*** *Diámetro exterior del rodete.*

***Ecuación 21.*** *Diámetro del rodete.*

***Ecuación 22.*** *Longitud del rodete.*

***Ecuación 23.*** *Cálculo del paso de los álabes.*

***Ecuación 24.*** *Ecuación de continuidad.*

***Ecuación 25.*** *Ecuación de momento o Navier-Stokes.*

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

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 GENERALIDADES

En este momento, el grupo de investigación MATyER-CADD del ITM en conjunto con el grupo de energías alternativas GEA de la Universidad de Antioquia, realiza la validación numérica de una turbina tipo hélice de 2kW de potencia existente.

El proyecto se encuentra dividido en 3 fases:

- La fase I, que es la fase inicial del proyecto, y el alcance total para esta propuesta y en la cual se va a realizar la validación numérica del cálculo teórico de la turbina tipo hélice (CFD vs Teoría).
- La fase II, en la cual se va a realizar una validación del modelo numérico obtenido respecto al funcionamiento real (CFD vs Experimental).
- La fase III, en donde se realiza un proceso de optimización de la turbina tipo hélice mediante una variación de los parámetros geométricos que influyen en la potencia generada (Optimización CFD).

El proyecto se lleva a cabo en el laboratorio de modelado del ITM, y el proceso de simulación numérico se realiza con el software ANSYS CFX 16.0®. La finalidad del proyecto es realizar un comparativo entre el análisis numérico (CFD) y el diseño teórico para una turbina tipo hélice de 2 kW, con un salto de 4m y un caudal de 0,12 m<sup>3</sup>/s de agua y de este modo determinar la eficiencia de la turbina y recomendaciones de mejora.

Este tipo de estudios se llevan a cabo con el fin de mejorar estos sistemas, y por ende mejorar el desarrollo social, la salud y la educación de pequeñas poblaciones que carecen de energía eléctrica. Por ello el grupo MATyER-CADD del ITM está enfocado en la investigación de las turbinas para pequeñas centrales hidroeléctricas-PCH's buscando

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

procesos de optimización y de esta forma contribuir con la mejora de esta fuente de generación renovable de energía eléctrica.

Anteriormente, el diseño de turbinas hidráulicas se basaba únicamente en correlaciones empíricas obtenidas a partir de la experimentación, las cuales en algunos casos no aplicaban satisfactoriamente para el diseño geométrico de las turbinas hidráulicas tipo hélice. Por este motivo se busca validar numéricamente la eficiencia de las ecuaciones de diseño de turbinas de hélice disponibles en la literatura. Esto corresponde a la fase I del proyecto global tal como se explicó inicialmente.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

Validar numéricamente mediante simulaciones computacionales la eficiencia de las correlaciones teóricas disponibles en la literatura para el diseño hidráulico de turbinas de hélice.

### **1.2.2 Específicos**

- Realizar un estado del arte sobre los procesos de simulación numérica y las ecuaciones indispensables usadas para el diseño de las turbinas tipo hélice.
- Modelar el volumen de agua que hay inmerso al interior de la turbina.
- Configurar el modelo de cálculo por medio de la selección de condiciones de frontera, modelo de turbulencia adecuado, método de acoplamiento entre las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.
- Procesar los datos obtenidos por medio del análisis numérico.
- Validar los resultados del análisis numérico por medio de un comparativo entre la potencia de diseño teórica y numérica.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### **1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

En la primera parte del presente proyecto se muestra un estado del arte, con el fin de dar a conocer características principales y terminología usados en el desarrollo de la tesis, y de esta forma brindar un mejor acompañamiento y direccionamiento al lector, respecto al tema de las turbinas tipo hélice.

A continuación, se presenta el desarrollo del contenido, la metodología y resultados de la tesis. En esta parte se exponen definiciones, planos, gráficos e imágenes de los procedimientos utilizados para el proyecto, con el fin de dar a entender todo el proceso de investigación y solución del proyecto.

Por último, se publican los resultados, a partir de conclusiones, obtenidas de los resultados arrojados por la simulación, además se exponen opciones de mejora para optimizar el funcionamiento del sistema en el laboratorio de la universidad de Antioquia, con el fin de aumentar la generación de potencia, que es el objetivo del proyecto.

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

## 2 MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 TURBINAS HIDRÁULICAS

#### 2.1.1 Definición

Las turbomáquinas hidráulicas son máquinas rotativas, las cuales realizan la transferencia de energía entre un fluido que circula y un rotor conformado por álabes o aletas. Si el fluido es quien cede energía al rotor se le conoce como turbina. (Fernandez, 2012)

Para el estudio de las turbinas hidráulicas se conocen 3 métodos, los cuales son:

- Método analítico, que se fundamenta en el estudio del comportamiento del fluido al pasar por los álabes, a partir de los principios de mecánica de fluidos.
- Método experimental, en donde su campo de estudio es la formulación empírica de la hidráulica y la experimentación.
- Análisis dimensional, donde se relacionan variables que intervienen en el proceso, confirmando los coeficientes de funcionamiento de las turbomáquinas. (Turbinas Hidráulicas)

#### 2.1.2 Conceptos básicos.

- **Cabeza neta  $H_n$** : Se define como la cabeza disponible para realizar el trabajo sobre la turbina.
- **Cabeza nominal  $H_r$** : Se define como la cabeza neta a plena apertura de la turbina que entrega la capacidad nominal del generador.

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

- **Potencia de la turbina:** Se define como

$$P = 9.81H_n Q \eta [\text{kW}] \quad (1)$$

*Ecuación 1. Potencia de la turbina.*

Donde:

$H_n$ : Cabeza neta de diseño en metros.

$Q$ : Caudal nominal en  $m^3/s$ .

$\eta$ : Eficiencia de la turbina.

- **Velocidad específica:** Es aquella velocidad a la cual gira un modelo geométrico semejante a la turbina real, bajo una cabeza de un metro para producir 1kW.

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H_n^{1.25}} \quad (2)$$

*Ecuación 2. Velocidad específica de una turbina.*

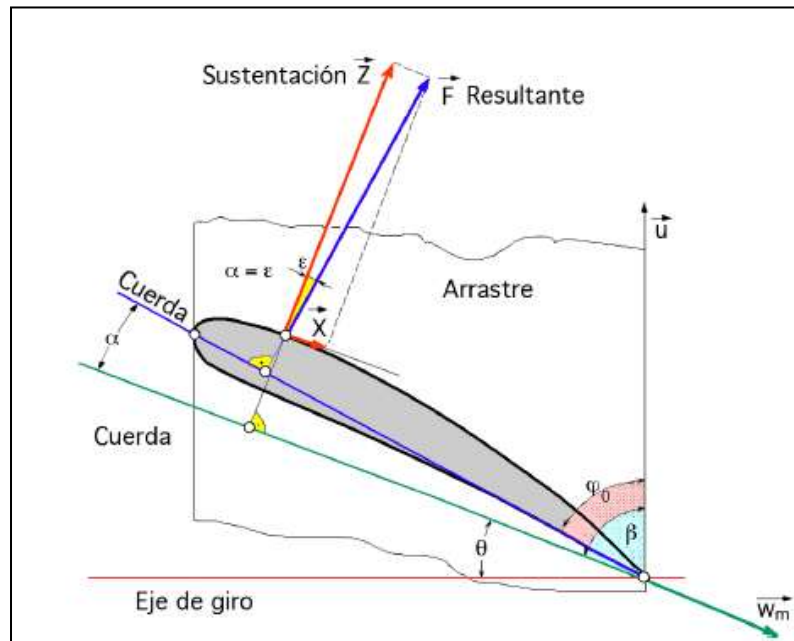
Donde:

$N$ : Velocidad sincrónica [rpm].

$P$ : Potencia de la turbina [kW].

$H_n$ : Cabeza neta de diseño [m].

- **Angulo de ataque:** Angulo que forma la cuerda geométrica de un perfil con la dirección del fluido circundante. (Fernandez, 2012)



**Figura 1.** Potencia de la turbina. (Fernandez, 2012)

- El Ángulo de ataque en la imagen anterior, se encuentra entre la cuerda del perfil y velocidad media del agua ( $W_m$ ), es decir, el ángulo  $\alpha$ . (Fernandez, 2012) Se representa en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \beta - \varphi_0 \quad (3)$$

**Ecuación 3.** El ángulo de ataque de una turbina.

Donde:

$\alpha$ : Es el ángulo de ataque.

$\beta$ : Es el ángulo que se forma entre la dirección U y la cuerda del perfil.

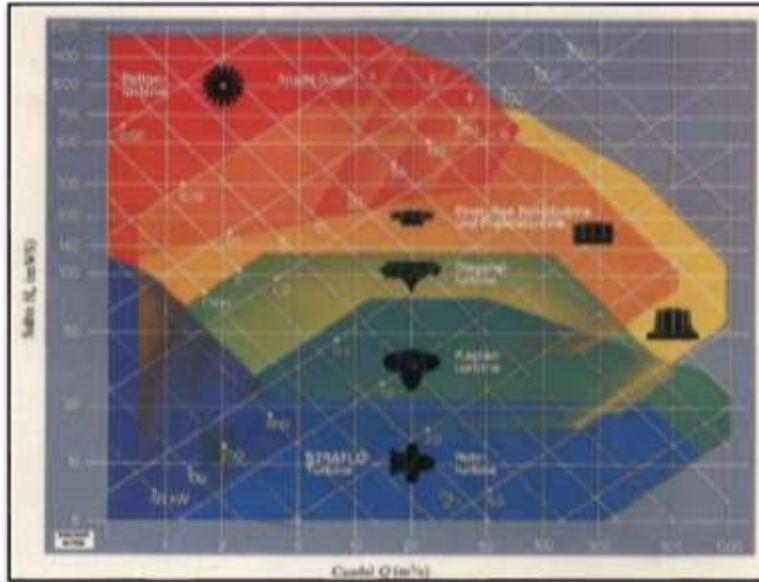
$\varphi_0$ : Es el ángulo que se forma entre la dirección U y la dirección del fluido.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.2 Clasificación turbomáquinas

A continuación se muestra la [figura 2](#) para la selección del tipo de turbina, dependiendo de las condiciones de operación y de instalación como son el salto [m] o cabeza y el caudal [m<sup>3</sup>/s]



**Figura 2.** Ábaco para la selección del tipo de turbina. [9]

Se puede observar que para saltos altos y caudales pequeños se puede utilizar una turbina Pelton, mientras que para saltos pequeños y caudales altos, trabajan muy bien las turbinas tipo Kaplan, lo cual corresponde con los datos de diseño [4m – 0,1214 m<sup>3</sup>/s].

A continuación se muestra la [tabla 1](#) con las turbinas existentes en la actualidad y muestran las características de trabajo para las cuales están diseñadas cada una de ellas:

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

Velocidad específica (Ns)	Tipo de turbina	Altura del salto (m)
Hasta 18	Pelton con 1 tobera	800
18 a 25	Pelton con 1 tobera	800 - 400
26 a 35	Pelton con 1 tobera	400 – 100
26 a 35	Pelton con 2 toberas	800 – 400
36 a 50	Pelton con 2 toberas	400 – 100
51 a 72	Pelton con 4 toberas	400 – 100
55 a 70	Francis lentísima	400 – 200
70 a 120	Francis lenta	200 – 100
120 a 200	Francis media	100 – 50
200 a 300	Francis veloz	50 – 25
300 a 450	Francis ultra velocísima	25 – 15
400 a 500	Hélice velocísima	Hasta 15
270 a 500	Kaplan lenta	50 – 15
500 a 800	Kaplan veloz	15 - 5.
800 a 1100	Kaplan velocísima	5

**Tabla 1.** Selección del tipo de turbina. (Perez, 2012)

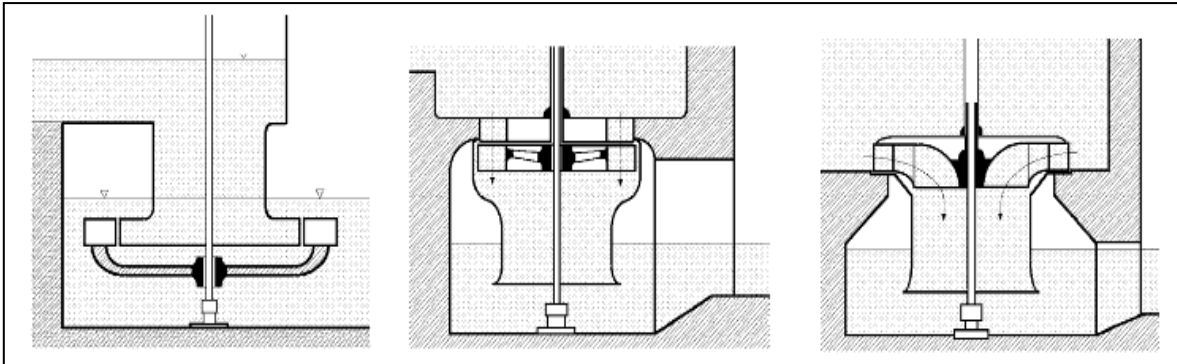
Como se puede observar, gracias a diferentes estudios, se han encontrado los parámetros específicos para cada tipo de turbina, en donde pueden realizar una generación más eficiente de energía, y en donde la elección está directamente relacionada con la velocidad específica de la turbina.

Básicamente, las turbomáquinas se pueden clasificar de acuerdo a 3 aspectos fundamentales:

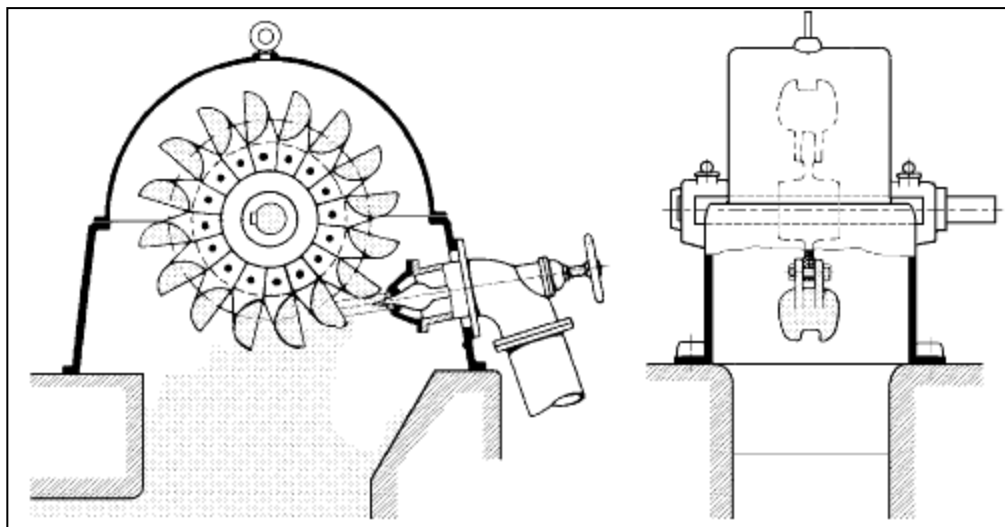
### 2.2.1 De acuerdo al cambio de presión en el rodete o al grado de reacción:

- **Turbinas de reacción:** Son aquellas en las que el fluido de trabajo si se afecta su presión de forma importante en su paso a través del rodete.
- **Turbinas de acción:** son aquellas en las que el fluido de trabajo no se afecta su presión de forma importante en su paso a través del rodete [2].

a. Turbina founeyron.      b. Turbina Heuschel-Jonvalc. Turbina francis



**Figura 3.** Turbinas de reacción. a) Turbina Founeyron, b) Turbina Heuschel-Jonvalc, c) Turbina Francis.



**Figura 4.** Turbinas de acción.

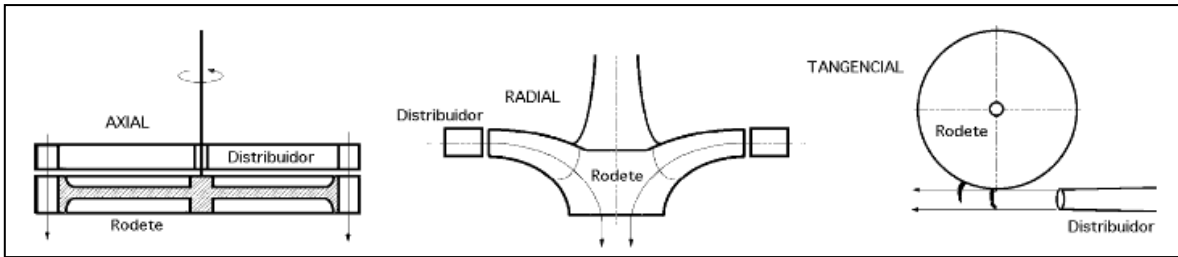
### 2.2.2 De acuerdo a la dirección de entrada del agua:

- **Axiales:** El agua entra de forma paralela al eje.
- **Radiales:** El agua entra perpendicular al eje.
- **Mixtas:** es una combinación de las anteriores.
- **Tangenciales:** El agua entra lateral o tangencialmente contra las palas, cangilones o cucharas de la rueda [2].

**a. Axial**

**b. Radial**

**c. Tangencial**

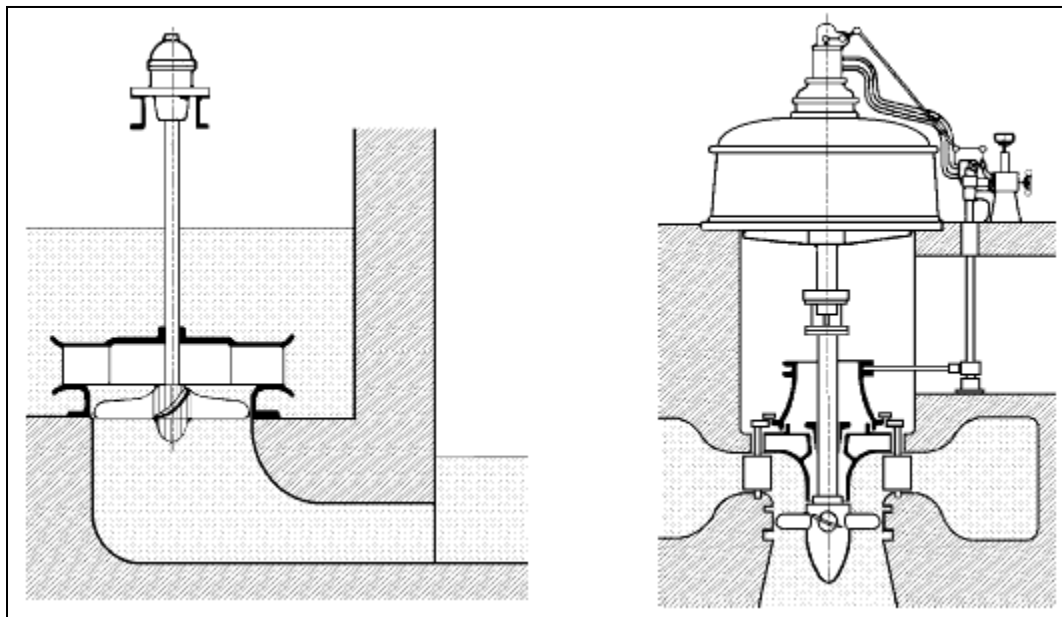


**Figura 5.** Clasificación de acuerdo a la entrada de agua. a) Turbina Axial, b) Turbina Radial, c) Turbina Tangencial.

### 2.2.3 De acuerdo al diseño del rodete

Para esta clasificación se debe tener en cuenta las variaciones en cuanto al tamaño, ángulo de los álabes o cangilones, o de otras partes de la turbomáquina distintas del rodete.

- **Turbina Kaplan:** Son turbinas axiales que permiten la variación de los ángulos de sus paletas durante el funcionamiento.



**Figura 6.** Turbinas Kaplan.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Turbina Pelton:** Son turbinas de flujo transversal con cucharas en vez de paletas o álabes.
- **Turbina Francis:** Son turbinas de flujo mixto y de reacción. [2]
- **Turbina hélice:** Son exactamente iguales a las turbinas Kaplan, su diferencia radica en que estas no pueden variar el ángulo de sus paletas [2]. Por esta razón, estos dispositivos son utilizados para salto y caudal prácticamente constante, pero para saltos pequeños y caudales grandes, ya que el rendimiento es en promedio del 90% si esta en las condiciones antes mencionadas. Son utilizadas básicamente para velocidades específicas mayores a  $n_s \geq 450$ . (Suescún, 2013)

Este tipo de turbina es la que se utilizará en el presente proyecto.

## 2.3 TURBINA HÉLICE

Las turbinas tipo hélice se encuentran dentro de las turbinas hidráulicas de reacción de flujo axial. Su característica principal es el hecho de que los álabes del rodete son fijos, a diferencia de las turbinas Kaplan donde los álabes de su rodete permiten la variación del ángulo de ataque.

Las turbinas tipo hélice son idóneas para trabajar tanto de forma horizontal, como vertical. El rodete de estas, está conformado por pocos álabes y giran en un mismo sentido, por ende son irreversibles. Idóneas para trabajar con granes caudales y pequeños saltos. Cuando se tiene en funcionamiento en un sitio en el cual el caudal y el salto son constantes, se obtienen más de un 90% de eficiencia en generación. (Caracterización de una turbina axial)

En la [tabla 2](#) se muestran las características que debe tener la turbina tipo hélice, de acuerdo a la velocidad relativa.

$n_s$	400-500	500-600	600-750	750-900	> 900
Z	7 a 8	6	5	4	3
$H_m$ (metros)	60	50	40	20	5
Relación de cubo	0,6	0,55	0-5	0,4	0,3

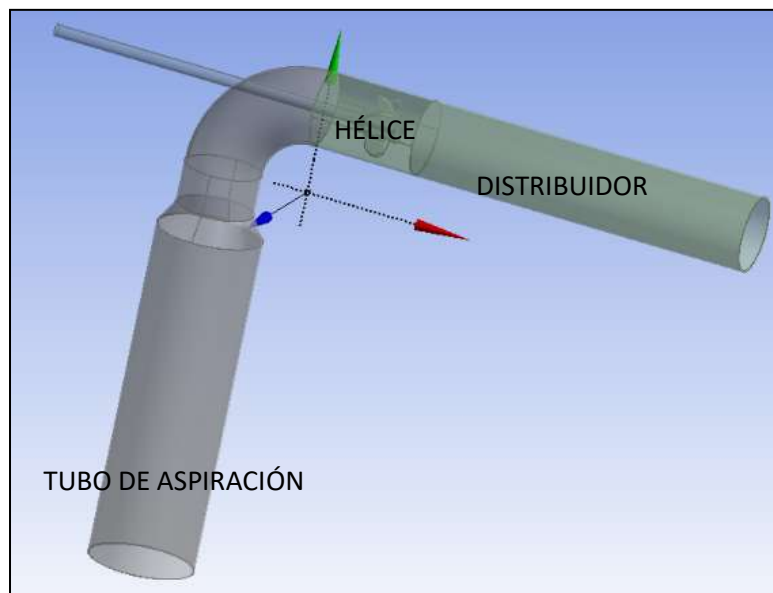
**Tabla 2.** Características geométricas y de operación de la turbina tipo hélice. (Suescún, 2013)

Se observa que a medida que aumenta la velocidad relativa de rotación, se reduce los valores de número de álabes, la cabeza hidráulica y el diámetro del rodete.

### 2.3.1 Partes de la turbina hélice

Las partes que conforman una turbina tipo hélice son las siguientes:

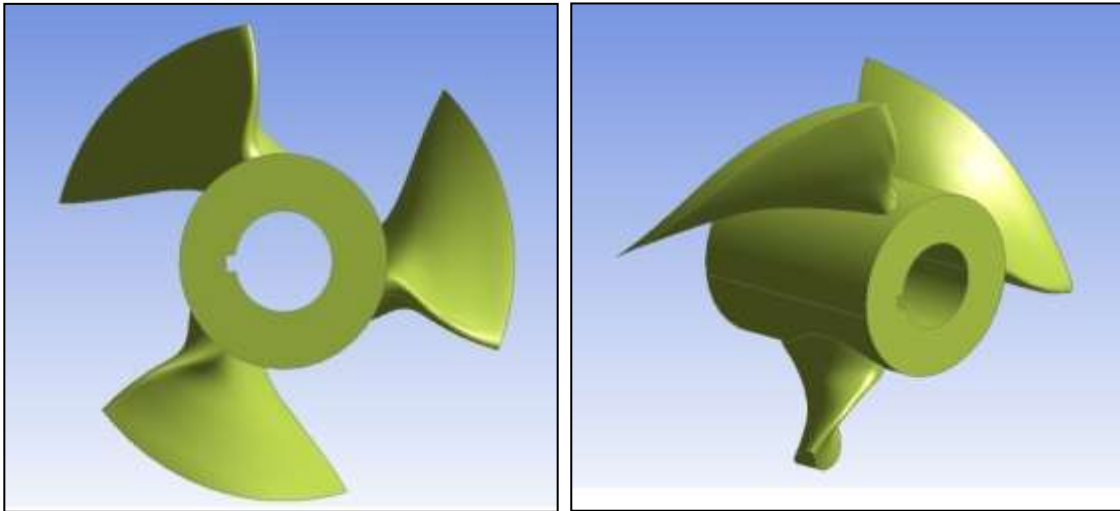
- **Distribuidor:** Es el elemento que dirige el flujo hasta la entrada del rodete, en dirección y magnitud apropiadas.
- **Tubo de aspiración:** Es la parte que recoge el fluido que sale del rodete y lo guía, con el fin de disminuir su energía cinética y recupere su presión estática.



**Figura 7.** Partes de la turbina Hélice.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Rodete:** Es el punto exacto en el cual se genera el intercambio de energía mecánica en la turbina. El rodete obtiene la energía a partir del fluido que pasa a través de sus álabes.



**Figura 8.** Rodete de la turbina hélice.

### 2.3.2 Estudios sobre la turbina tipo hélice

Desde que se comenzaron a estudiar las turbomáquinas hidráulicas, se ha buscado encontrar la mayor eficiencia posible en el proceso de generación de energía, a partir de las hidroeléctricas.

Estudios importantes se han llevado a cabo. Uno de estos fue el que realizaron en Johannes Kepler University, en donde estudiaron todo lo relacionado con el modelado de los álabes para una turbina Kaplan en el 2012, y encontraron que, para realizar el análisis numérico de las turbinas tipo hélice, es importante utilizar el método isogeométrico, ya que representa un análisis mucho más completo y con menor cantidad de errores en las ecuaciones [8].

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con ayuda de estos estudios es que se ha llegado a la construcción de nuevas y mejores turbinas, que se adaptan de manera más eficiente a ciertos parámetros de trabajo, proporcionando un mayor aprovechamiento del fluido, y, por ende, generando mucha más energía.

Desde este punto nace la posibilidad de encontrar una cantidad de turbinas con características diferentes, con el fin de mejorar los procesos de generación de energía eléctrica.

Para el presente caso de estudio, sobre las turbinas hélice, se han realizado diversos estudios en los que se han expuesto diferentes teorías relativas para los cálculos, y en donde una de las principales expresa que son ideales para trabajar con velocidades específicas entre 400 y 500. (Cordón, 2012)

Una de estas teorías expresa que, si el fluido entra sin chocar en alguna pared, los álabes de la turbina, al comienzo y en el centro deben ser lo más vertical posible. [4] Esto fue concluido a partir de un estudio realizado en la Universidad Nacional de la Plata, Argentina, en donde llevaron a cabo una simulación para una turbina Kaplan de 5 álabes en el rodete. También dan a conocer datos importantes para mejorar el funcionamiento. Uno de estos es fabricar la cabeza del rodete o el cubo de la hélice con un diámetro de 0.4 veces del diámetro del tubo de aspiración, con lo que se mejora la circulación del fluido, de esta forma existe la posibilidad de alcanzar velocidades por encima de 850. (Cordón, 2012)

### **2.3.3 Uso de CFD para el análisis de las turbomáquinas**

El objetivo principal de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es la simulación de fluidos para conocer su comportamiento y conocer el proceso de transferencia de energía en un sistema. Su base son los métodos numéricos, con los cuales se busca describir las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía para un fluido en estudio. (Riveros, 2008)



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la turbomaquinaria es indispensable el estudio CFD, ya que es importante para el análisis de flujos líquidos, gas o vapor a través de los diferentes componentes del sistema, para conocer y mejorar posibles problemas que se puedan presentar. [2] Además, por medio de las diferentes técnicas CFD podemos resolver problemas como la simulación de sistemas existentes en nuestro medio, mejoras de diseño y la simulación de procesos para conocer el comportamiento y la interacción de los fluidos y flujos con partes estacionarias en los sistemas.

En este punto se han llevado a cabo innumerables incursiones, ya que se ha transformado en una herramienta indispensable para el diseño y estudio de turbinas. Este brinda un apoyo y un conocimiento acerca de los fenómenos que se pueden encontrar, tanto en el sistema, como en el medio de trabajo.

Para las turbinas tipo hélice han sido muchos los casos de estudio. En el 2011, el Turboinstitute llevó a cabo una investigación sobre las turbinas de flujo axial. Este fue enfocado en el cubo y las puntas de la hélice, obteniendo unos resultados poco satisfactorios, ya que con la simulación con modelos de turbulencia inestacionarios, arrojaron curvas de eficiencia muy bajas. Por tal motivo se concluyó que, para el estudio de estas turbinas, se requiere la utilización de modelos avanzados de turbulencia. Debido a esto, llevaron a cabo otra simulación con estos nuevos modelos de turbulencia avanzados, en donde usando modelos  $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon$  CC KL, mejoraron su eficiencia en gran manera, obteniendo valores semejantes a los encontrados a partir de la teoría. [5] Este estudio es de gran importancia para el presente proyecto, ya que se explican los diferentes modelos de turbulencia que pueden ser usados en un sistema inestacionario, con el fin de obtener un valor del rendimiento y de potencia más exactos, ya que el análisis se hace a partir de ecuaciones generadas por fenómenos de turbulencia más cercanos a lo real.

Para otro caso en el que ha sido utilizado el software es para observar el fenómeno de cavitación en la turbina, ya que existen sistemas en los cuales el fluido cambia de velocidad durante el recorrido, por tal motivo, produce este fenómeno. Las hélices de los barcos son

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

las más propensas a este fenómeno, según un estudio realizado en la universidad nacional de Seúl, en donde explican que la hidrocínética a la cual están expuestas las hélices, genera cavitación en estas, lo cual genera vibración y un desgaste prematuro en las superficies de la turbomáquina. (Dongo, 2014)

En casos como estos es que se observa la necesidad de utilizar un análisis CFD, ya que para disminuir este tipo de fenómenos y mejorar el sistema completo, es necesario conocer el porqué del problema y las posibles soluciones a partir del análisis y los resultados conocidos.

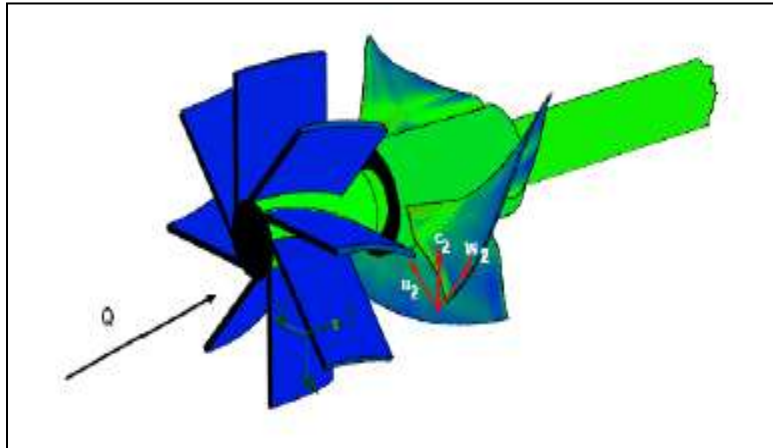
Por tal motivo es importante utilizar el análisis fluido-dinámico computacional, para cualquier sistema hidráulico, ya que va a permitir conocer el comportamiento del fluido, del sistema y las soluciones que pueden presentarse para un problema o fenómeno en específico.

Con este fin es que se desea llevar a cabo el presente proyecto, ya que como se ha expresado antes, es necesario conocer el funcionamiento y el comportamiento del sistema, los posibles problemas que pueda presentar y conocer un dato más acertado de la potencia que genera la turbina hélice.

#### **2.3.4 Principio de funcionamiento de Turbinas hélice.**

Para el funcionamiento de la turbina hélice es necesario que el fluido ingrese a la turbina y se ponga en contacto directo con los álabes del rodete, a una velocidad constante  $c_2$  y un ángulo absoluto  $\alpha_2$ . Esta velocidad se puede descomponer en la velocidad tangencial  $U_2$  y la velocidad relativa  $W_2$ . La velocidad relativa al álabe, incidirá sobre los álabes de forma tal que se genere una transferencia de energía máxima, tratando de minimizar los riesgos de reducir la eficiencia.

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



**Figura 9.** Principio de funcionamiento.

La componente para la velocidad absoluta del fluido en dirección axial, se mantiene constante, tanto a la entrada como a la salida del rodete. Por tal motivo se cumple que:

$$C = U + V$$

La componente tangencial de la velocidad a una distancia determinada del eje de giro se define por:

$$U = rW$$

**Ecuación 3.** Componente tangencial de la velocidad.

Donde:

**r**: Radio del cilindro imaginario coaxial por donde discurre el flujo.

**W**: Velocidad angular del rodete.

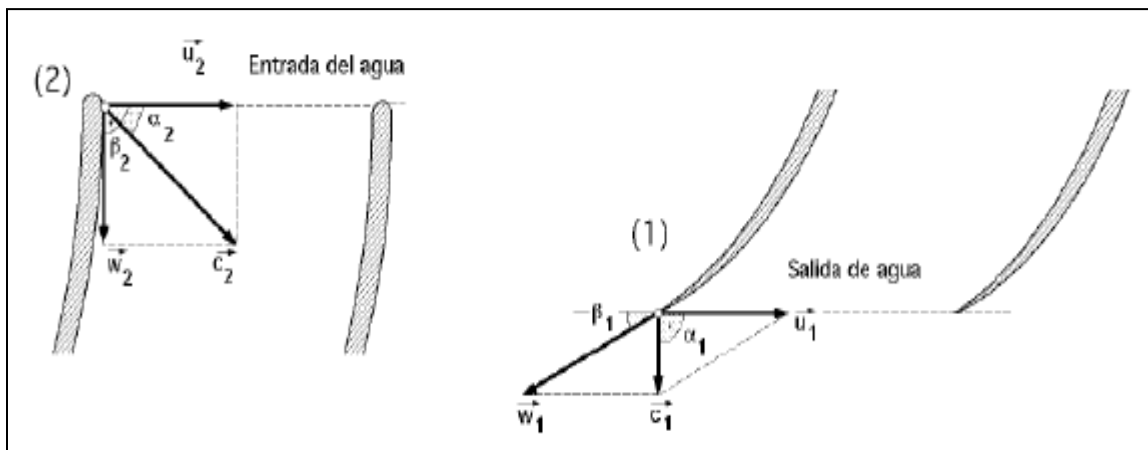
Es importante anotar que para que exista una mayor eficiencia en el funcionamiento de este tipo de turbina, se requiere que los álabes del rodete tengan un diseño aerodinámico, ya que permiten obtener unas buenas condiciones de sustentación y así mayor carga estática, permitiendo reducir las pérdidas de energía por fuerza de resistencia y arrastre.

En pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's), se produce una transformación de energía cinética y potencial del agua, a energía eléctrica. El salto útil, que expresa la energía mecánica por unidad de masa intercambiada en el rodete de la turbina viene dada por la ecuación de Euler:

$$Hu = \left(\frac{1}{g}\right) * (u_2 c_2 - u_1 c_1)$$

**Ecuación 4.** Transformación de la energía para pequeñas centrales hidroeléctricas. Ecuación de Euler.

Esta ecuación a su vez se obtiene de aplicar el teorema del momento cinético a un tubo de corriente entre las superficies de entrada y salida del rodete, el cual expresa que la variación del momento cinético del fluido, que está contenido entre 2 superficies de control transversal al movimiento del mismo, es igual al momento de las fuerzas que actúan sobre el fluido. (Riveros, 2008)



**Figura 10.** Ángulo de ataque.

De donde se obtiene que

$$Cu = cx \cos \alpha$$

En donde reemplazando la ecuación de Euler se obtiene:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$Hu = \left(\frac{1}{g}\right) * (u_2c_2\cos\alpha_2 - u_1c_1\cos\alpha_1)$$

**Ecuación 5.** Transformación de la energía.

La ecuación para el salto útil representa el trabajo específico del agua sobre un rotor cualquiera.

Para el salto neto H, que expresa la energía por unidad de masa disponible en la sección final de la tubería para efectuar el intercambio de energía en la turbina.

Por tal motivo, según el teorema de la mecánica de fluidos, la turbina absorbe del fluido una potencia Ph y transmite al generador una potencia P, expresadas en las siguientes ecuaciones:

$$Ph = rQH$$

**Ecuación 6.** Potencia absorbida por el fluido.

$$P = rQHu$$

**Ecuación 7.** Potencia transmitida por el fluido al generador.

Cabe anotar que la potencia transmitida al generador por medio del eje, es menor a la potencia que la potencia hidráulica a la entrada del rodete, ya que al entrar en contacto con los álabes se presentan pérdidas por rozamiento, choque y los cambios de dirección que allí se generan.

Desde esta perspectiva se define la eficiencia de la turbina como el cociente entre la potencia transmitida al generador, sobre la potencia hidráulica a la entrada del rodete y es expresada como (Rossgatterer, 2012)

$$N = \frac{Hu}{H}$$

**Ecuación 8.** Eficiencia de la turbina.

### 2.3.5 Diseño Hidráulico

➤ **Velocidad de giro:** para el diseño de un pico generador o una pequeña central hidroeléctrica, es indispensable conocer la velocidad a la cual va a girar la turbina, ya que es el dato de entrada para conocer el tipo de turbina a utilizar.

➤ **Potencia eléctrica:** Se expresa de la siguiente forma:

$$P = \frac{\eta_g * \eta * Q * \rho}{102}$$

*Ecuación 9. Potencia eléctrica generada por la turbina.*

**Donde**

$\eta_g$ : Eficiencia del generador.

$\eta$ : Eficiencia total.

$Q$ : Caudal m<sup>3</sup>/s.

$\rho$ : Densidad del fluido kg/m<sup>3</sup>.

Datos básicos para la turbina hélice que está en estudio en el presente proyecto:

<b>Datos entregados por GEA</b>		
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Velocidad angular	900	rpm
Potencia	2	kW
Cabeza hidráulica	4	m
Caudal	0,1214	m <sup>3</sup> /s
Diámetro tubo	0,106	m
Eficiencia	1	
Gravedad	9,81	m/s <sup>2</sup>

**Tabla 3.** Tabla de datos de diseño de la turbina.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Velocidad específica:** Es la principal característica de una turbomáquina, pues relaciona caudal, carga y velocidad de giro. De igual forma permite conocer qué tipo de turbina debe ser instalada de acuerdo al salto y al caudal que se tenga.

Esta se expresa de la siguiente forma:

$$N_s = \frac{\frac{NP_1}{2}}{H \left(\frac{5}{4}\right)}$$

**Ecuación 10.** Velocidad específica de la turbina.

Donde

$N_s$ : Número específico de revoluciones

$N$ : Revoluciones por minuto.

$H$ : Altura Neta.

El tipo de turbina más conveniente para utilizar en una central hidroeléctrica se determina a partir del salto neto  $H$  y la velocidad específica. Ver figura 2.

Para continuar con el cálculo de la turbina hélice de 2kW, se asume un salto de 4m y un caudal de 0.12m<sup>3</sup>/s. El rango de turbinas para la velocidad específica de 900 RPM, y para las condiciones iniciales, me determina un rodete de 3 álabes.

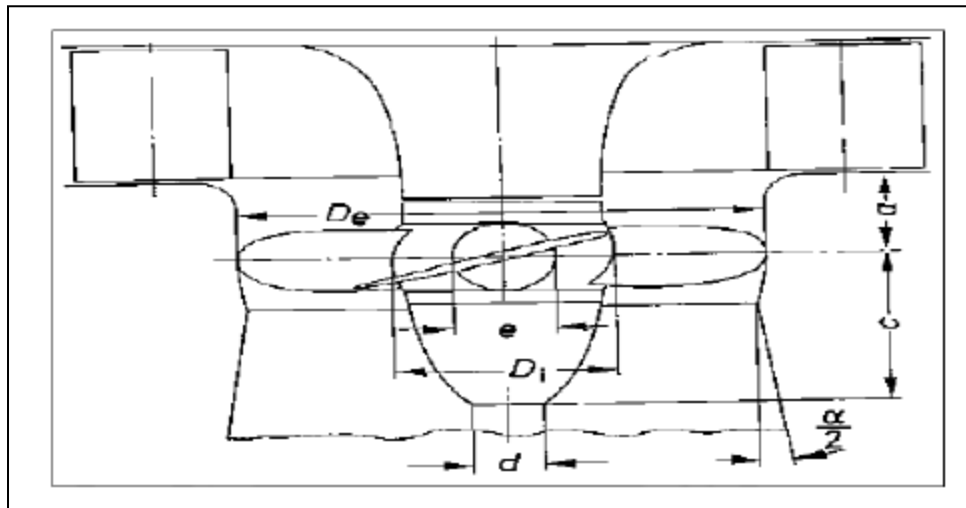
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.4 Diseño de turbina hélice

**Dimensiones de la turbina hélice:** A partir de autores como (Bohl, 1986; Siervo F, 1977; F Schweiger, 1987) se encuentran las siguientes tablas estadísticas con aproximaciones para obtener las fórmulas para el diseño del rodete.

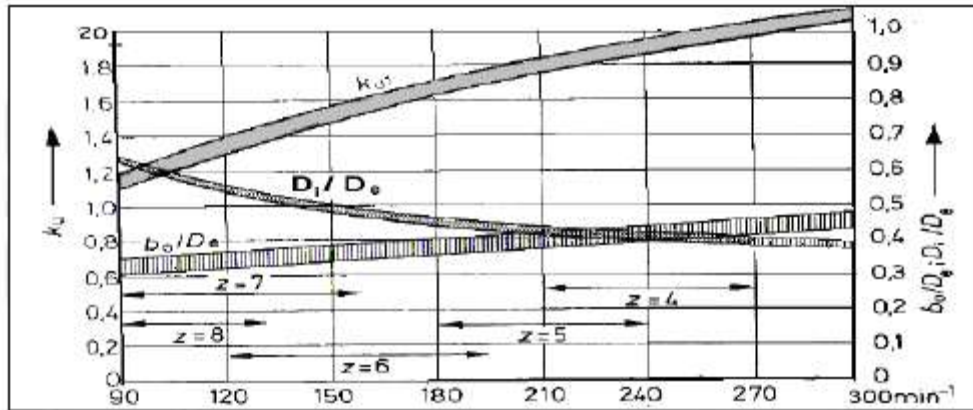
### 2.4.1 Método Bohl

**Método BOHL:** Para definir las dimensiones del rodete se necesita conocer el coeficiente de velocidad tangencial  $K_u$ , la cual se obtiene de la siguiente tabla:



**Figura 11.** Dimensiones principales del rodete.





**Figura 12.** Valores de dimensiones de la turbina hélice.

Las fórmulas para expresar este método se muestran a continuación:

$$De = 84.6 * Ku * \sqrt{H/N}$$

**Ecuación 11.** Diámetro externo del cubo.

$$Di = (0.4 - 0.6) * De$$

**Ecuación 12.** Diámetro interno del cubo.

$$d = (0.1 - 0.15) * De$$

**Ecuación 13.** Diámetro del rodete.

$$C = (0.45 - 0.6) * De$$

**Ecuación 14.** Longitud del rodete.

Donde:

**Ku:** es el coeficiente de velocidad tangencial.

### 2.4.2 Método de F Siervo

Se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$Ku = 0.79 + 1.61e^{-3}Ns$$

**Ecuación 15.** Coeficiente de velocidad tangencial.

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

**$Ku$** : Coeficiente de velocidad tangencial

**$Ns$** : Velocidad específica. RPM.

$$De = 84.6 * Ku * \sqrt{H/N}$$

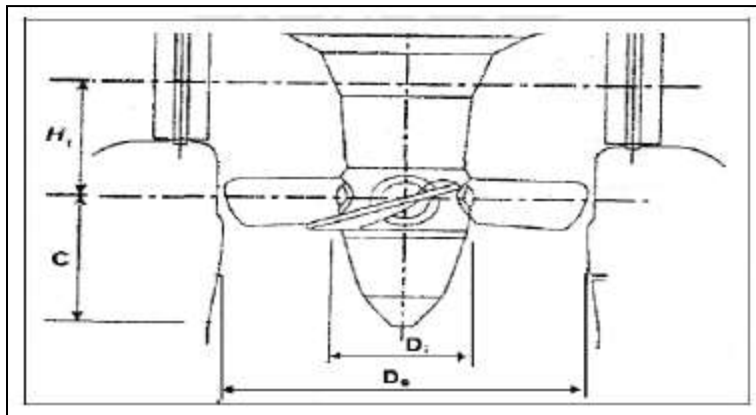
*Ecuación 16. Diámetro externo del cubo.*

$$Di = \left( 0,25 + \left( 94, \frac{64}{Ns} \right) \right) De$$

*Ecuación 17. Diámetro interno del cubo.*

$$C = (6,9Ns^{-0,403})De$$

*Ecuación 18. Longitud del rodete.*



**Figura 13.** Dimensiones principales de la turbina hélice.

#### 2.4.2 Metodo de F Schweiger

$$Ku = 0,8434 + 0,00456Nq$$

*Ecuación 11. Diámetro externo del cubo.*

$$De = 60Ku\sqrt{2gH/Nq\pi}$$

*Ecuación 12. Diámetro exterior del rodete.*

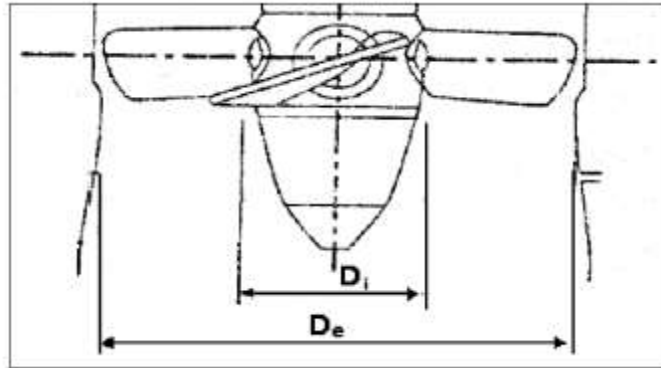
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$d = (0.1 - 0.15) * D_e$$

**Ecuación 13.** Diámetro del rodete.

$$C = (0.45 - 0.6) * D_e$$

**Ecuación 14.** Longitud del rodete.



**Figura 14.** Dimensiones principales de la turbina hélice.

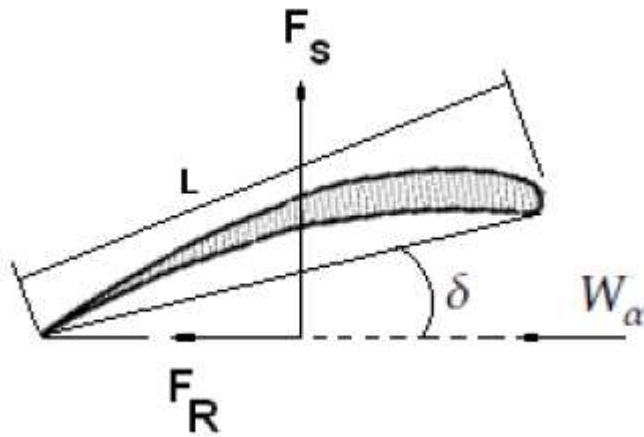
Es de esta forma cómo es posible obtener las dimensiones para el rodete de la turbina hélice, teniendo en cuenta las condiciones iniciales, como el caudal y el salto, además de la velocidad específica a la cual va a girar la turbina. En el presente proyecto no se realizará el cálculo de las dimensiones del rodete, ya que desde el grupo GEA de la universidad de Antioquia fue entregado el archivo CAD del rodete, el cual tiene las dimensiones especificadas. (Rossgatterer, 2012)

Selección de los álabes: para la selección del rodete se efectúa a partir del método de ala portante, cálculo que fue adoptado por primera vez por Bauersfeld para turbinas hidráulicas y hélices.

Al situar el ala portante en un espacio sin límites, se producen 2 fuerzas.

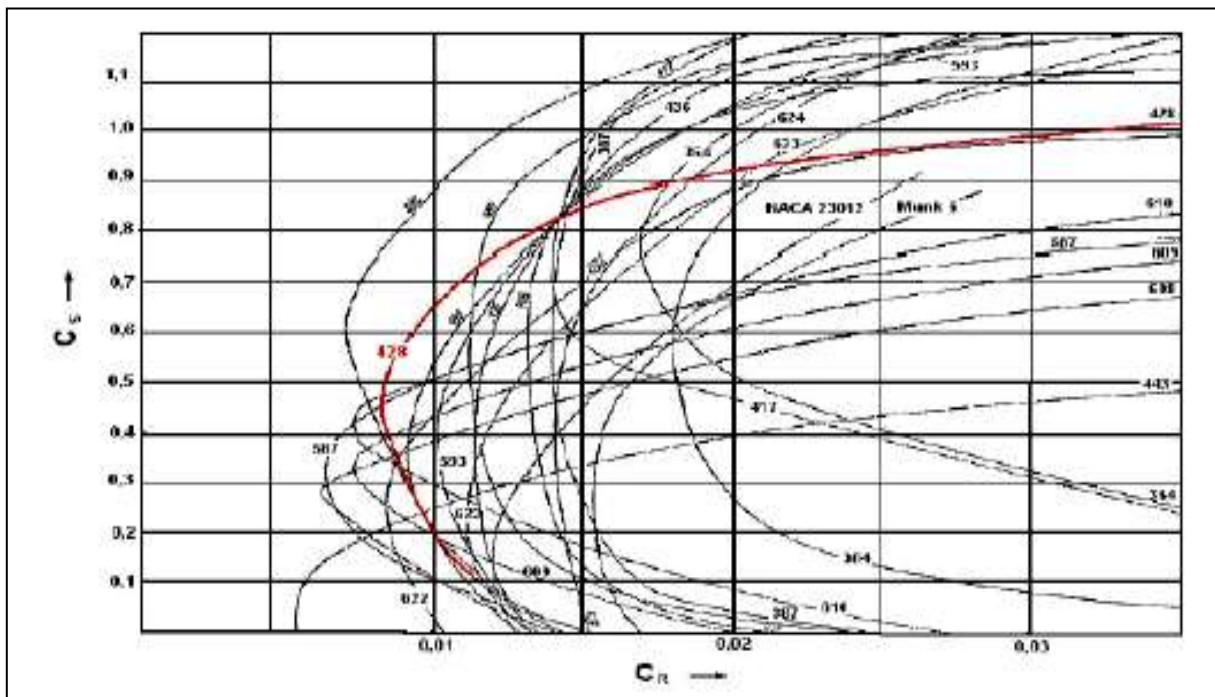
***F<sub>s</sub>***, perpendicular a la dirección del fluido, denominada fuerza portante.

***F<sub>r</sub>***, que actúa en la dirección de la corriente y constituye la resistencia del ala.

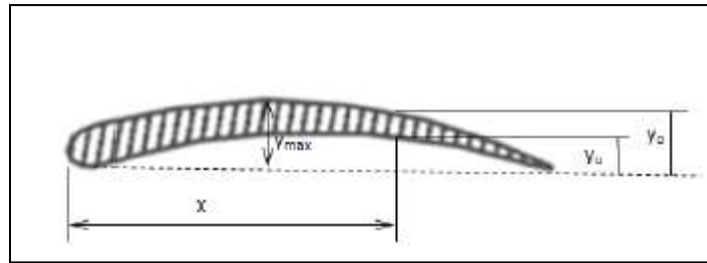


**Figura 15.** Fuerzas que actúan sobre el ala portante.

Para encontrar los coeficientes se hace necesario utilizar la siguiente tabla, sacada de las publicaciones de Gottingen. (Riveros, 2008)



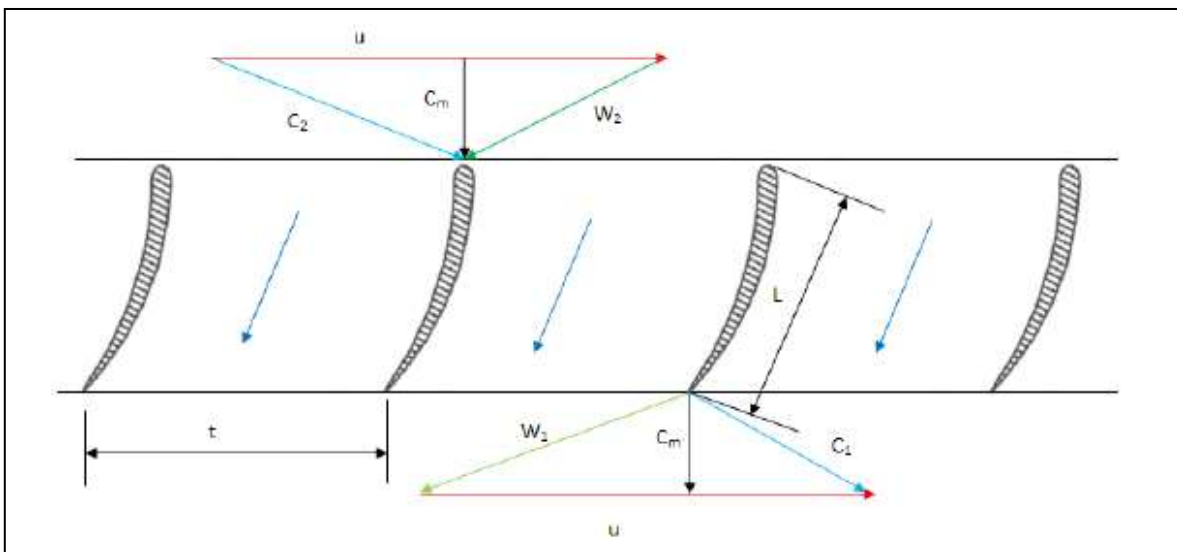
**Figura 16.** Curvas polares para los diferentes perfiles.



**Figura 17.** Perfil del ábabe.

## 2.5 Cálculo del rodete

Si se considera una sección cilíndrica del rodete, coaxial, de radio  $r$  y espesor  $dr$ , desarrollada sobre un plano, de forma que sobre el mismo se encuentren las trayectorias relativas al fluido y las secciones de los álabes formando lo que se conoce como persiana, parrilla o enrejado de álabes, de paso  $t$  y cuerda  $L$ , se puede obtener una solución aproximada del problema considerando un movimiento plano y permanente a través de dicha persiana.



**Figura 18.** Conjunto de álabes en una corriente de flujo.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$t = \frac{2r\pi}{Z}$$

**Ecuación 15.** Cálculo del paso de los álabes.

**Donde:**

***t***: Distancia entre álabes

***Z***: Número de álabes

***r***: Radio, m.

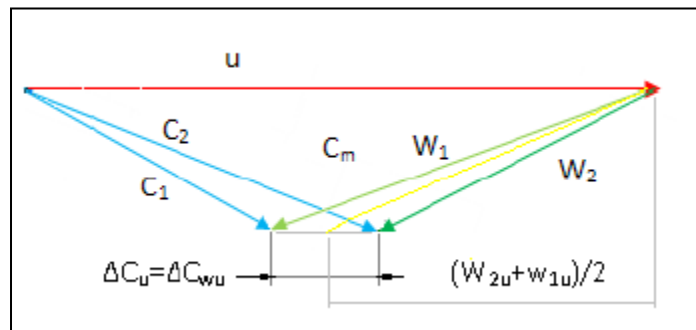
***L***: Longitud de la cuerda del álabe.

El cálculo se hará para un sistema de alabes con un grado de reacción  $0,5 < R < 1,0$ .

***C*<sub>1</sub> y *C*<sub>2</sub>**: Velocidades absolutas

***W*<sub>1</sub> y *W*<sub>2</sub>**: Velocidades Relativas

***C*<sub>m</sub>**: Velocidad axial



**Figura 19.** Triángulo de velocidades en el álabe.

**Generalidades sobre erosión:** El agua que entra en contacto con el rodete tiene a cargar con partículas sólidas en suspensión. Por tal motivo es importante realizar una decantación

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

natural antes de que esta entre en contacto con el rodete, de esta forma se minimiza el desgaste en los álabes, aumentando la vida útil de la turbomáquina.

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

## 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Análisis fluido dinámico de la turbina hélice.

El presente proyecto, se enfoca en el análisis fluido-dinámico de una turbina hélice, de 2kW de potencia generada, girando a una velocidad de 900RPM, con un caudal de 0.1214 m<sup>3</sup>/s y un salto neto de 4 m, con el fin de realizar la validación numérica del cálculo teórico de la turbina tipo hélice.

Para el presente proyecto fue necesario llevar a cabo la simulación para 2 geometrías diferentes, ya que el diseño original, por los componentes de la turbomáquina, producen grandes pérdidas, lo que aleja el valor del torque obtenido, respecto al calculado teóricamente, y lo cual se refleja en la generación de potencia.

Por tal motivo se decidió realizar 2 diseños, para analizar el comportamiento del fluido y de la turbina hélice; y analizar posteriormente, cual sistema es más propicio para generar los 2 kW de potencia.

Las geometrías simuladas son:

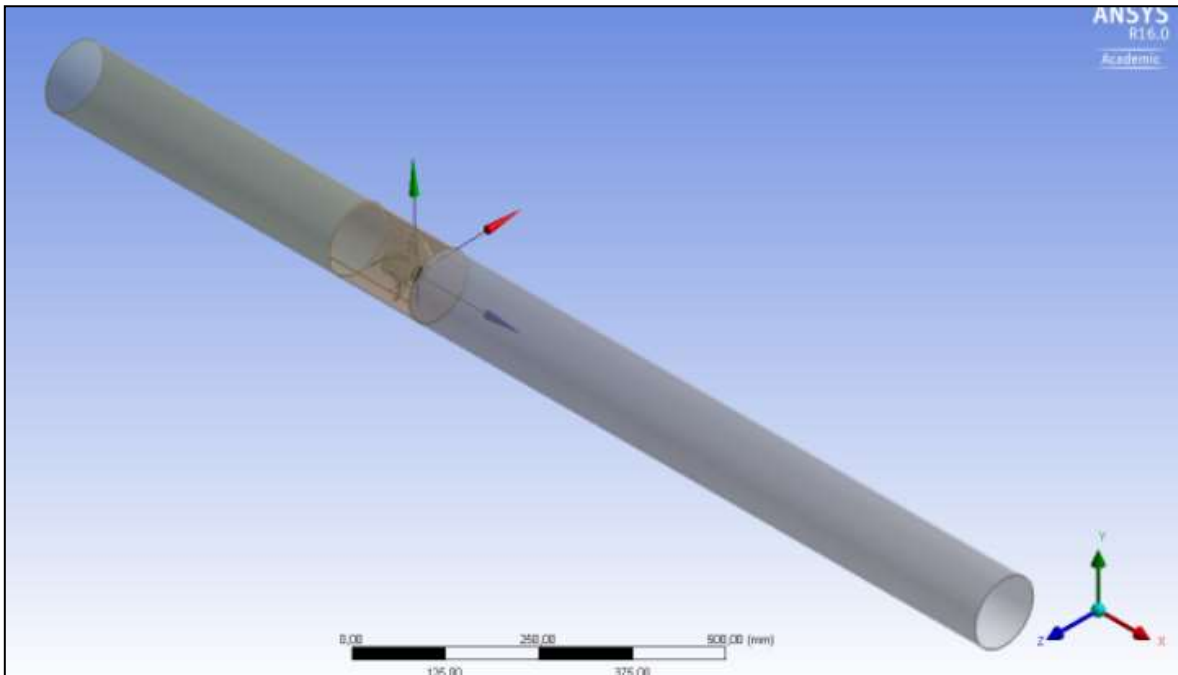
- Ensamble original, conformado por codo, eje, tobera y hélice.
- Ensamble ideal, conformado por tubo recto y hélice.

Este diseño se genera a partir de la necesidad de crear una geometría más acorde a la teoría para el análisis de las ecuaciones de fluidos, ya que es necesario conocer los resultados del estudio a unas condiciones ideales para este tipo de turbina.

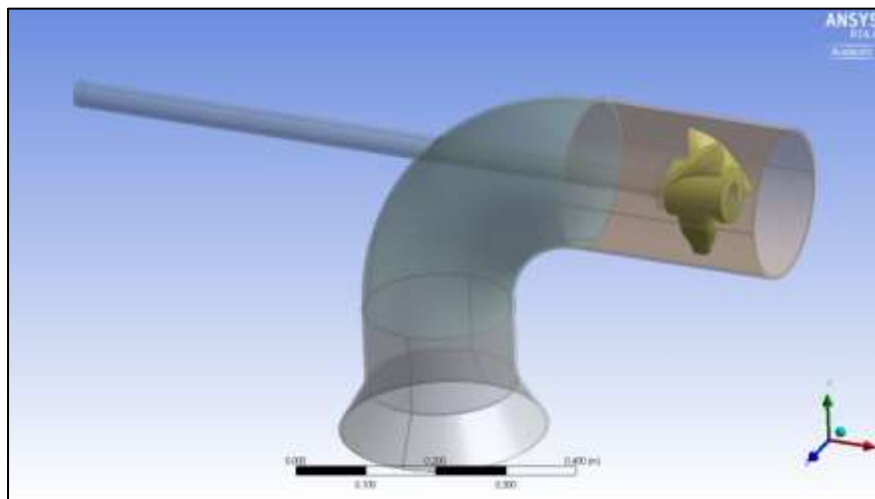
En la figura 20 se muestran las geometrías para las cuales se llevan a cabo las simulaciones. Es posible observar que son diseños sencillos, en donde es posible realizar el análisis de las



ecuaciones de Navier-Stokes, de forma que se adapta muy bien a la geometría y de esta forma se obtienen resultados mucho más cercanos a los teóricos.



**Figura 20.** Geometría ideal.

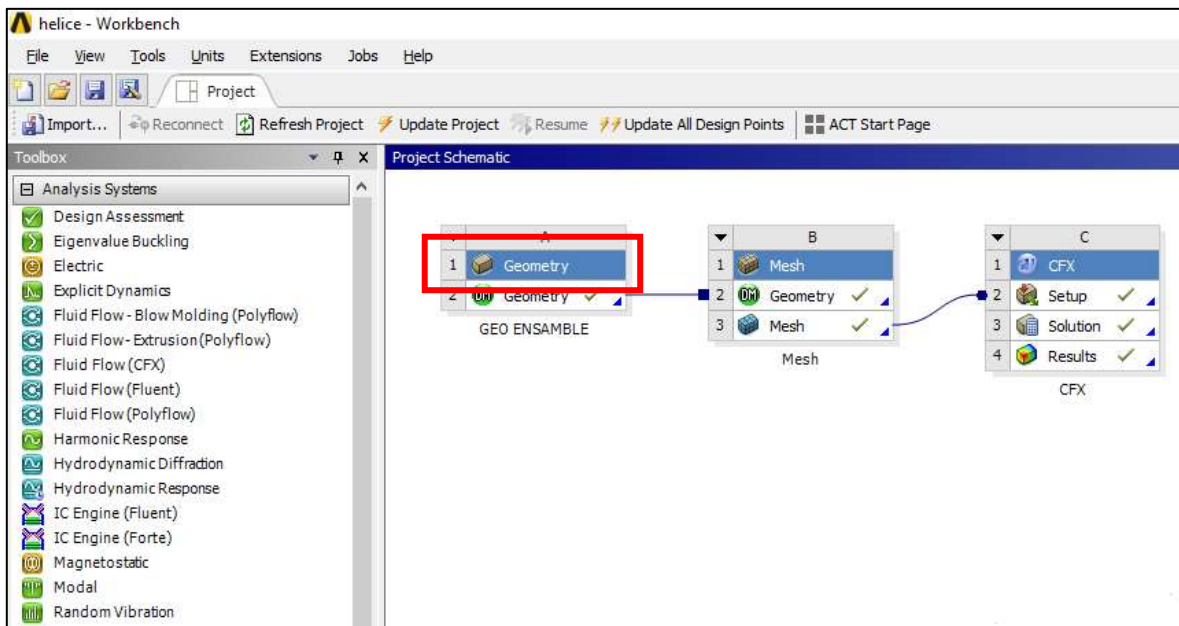


**Figura 21.** Geometría Original.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El diseño en formato CAD se generó a partir del archivo .IGES enviado desde el grupo GEA de la universidad de Antioquia, en donde se generó la geometría inicial. Haciendo uso de esta, en el software ANSYS CFX 16.0®, se realiza una serie de modificaciones a la geometría original, con el fin de crear una geometría acorde a la necesidad.

Esta acción se realiza ingresando en la ventana principal del software y luego haciendo uso del módulo GEOMETRY, el cual me permite realizar cualquier tipo de acción para modificar una geometría existente.

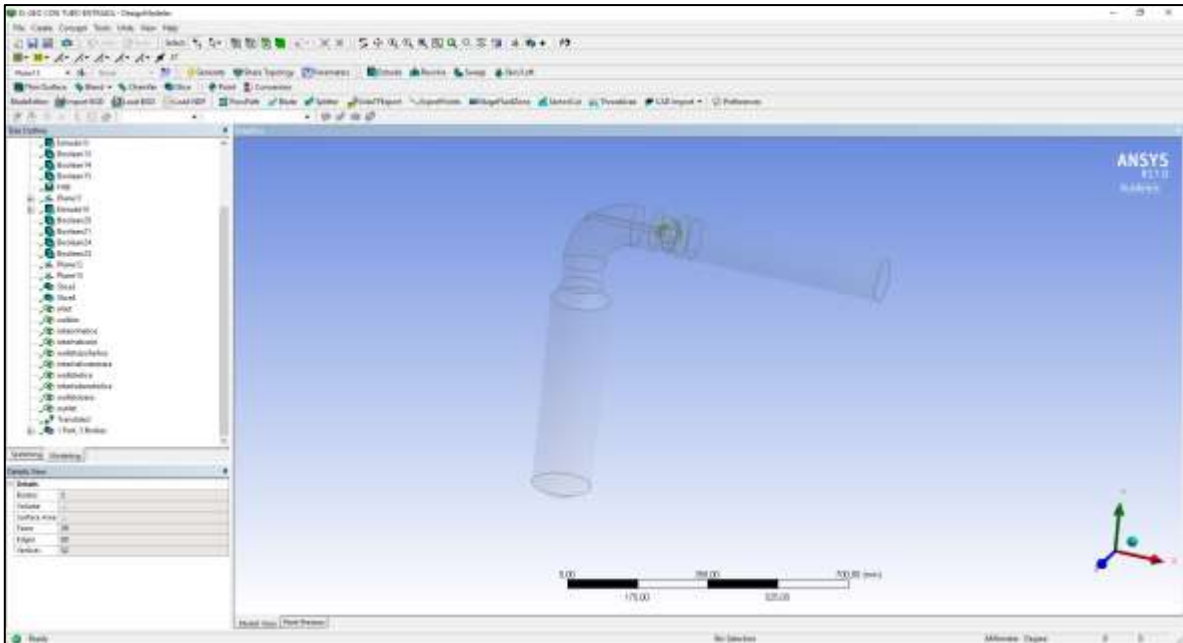


**Imagen 1.** Ventana principal ANSYS CFX 16.0®

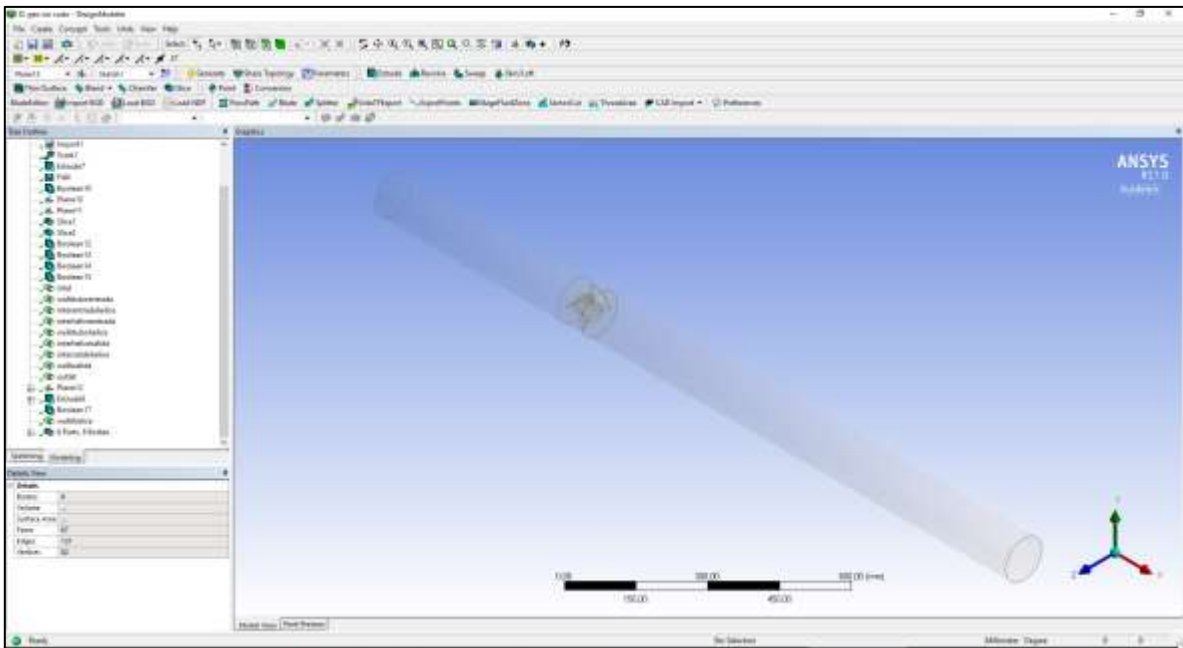
Después de obtener la geometría que se muestra en la figura, se procede a crear el volumen de control del sistema, con el fin de realizar el análisis hidrodinámico, debido a que este es el cuerpo considerado en el análisis dinámico de fluido computacional.

Para la obtención de este cuerpo, se realizan una serie de operaciones Booleanas, las cuales permiten, sustraer el cuerpo sólido y obtener el volumen del fluido con las condiciones de frontera pertenecientes a la turbina y sus elementos constitutivos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Imagen 2.** Volumen de control geometría original.



**Imagen 3.** Volumen de control geometría ideal.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### **3.2 Discretización: Generación de mallas.**

#### **3.2.1 Método de volúmenes finitos.**

En este punto se comienza con la discretización de la geometría, en donde se genera la malla del volumen, conformado por una serie de ecuaciones matemáticas que permiten que la geometría sea reconocida en el análisis.

Este método es conocido como el método de volúmenes finitos. Este método es generado por las mallas, las cuales permiten obtener y conservar cantidades relevantes, tales como masa, momento y energía; y de esta manera se pueden evaluar las ecuaciones de fluidos de Navier-stokes (Sanchez, Cardona, & Hincapié, 2015). Para el proyecto se generó una malla tetrahédrica ya que los valores requeridos están dentro de los límites permitidos. Una malla no debe contener agujeros entre celdas y éstas tampoco deben estar traslapadas una sobre otra. Idealmente, la transición entre volumen y forma de celdas adyacentes debe ser suave y los elementos generados deben ser lo más regulares posible. Esto tiene como objetivo prevenir el aumento de errores numéricos en la etapa de cálculo.

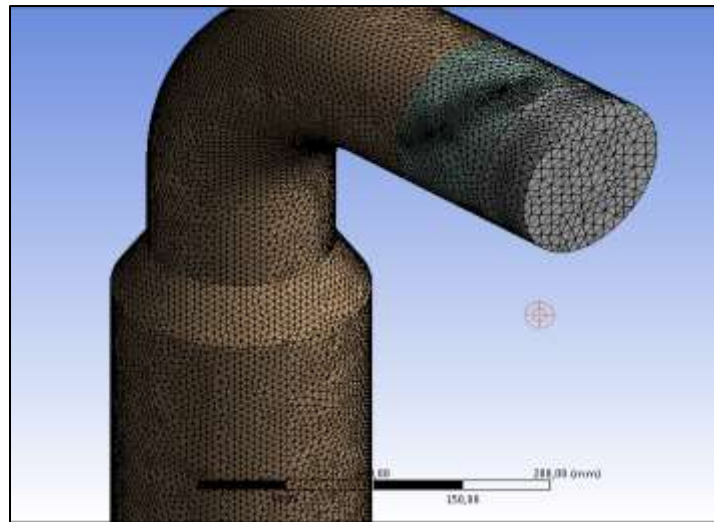
Para la validación del estado de las mallas, se deben tener en cuenta 3 aspectos importantes: La oblicuidad, la relación de aspecto y la calidad ortogonal. (Sanchez, Cardona, & Hincapié, 2015).

Para el caso de la oblicuidad, el valor se debe encontrar entre 0 y 1, pero es importante intentar generar un valor que se encuentre lo más alejado posible al límite superior, es decir, al 1.

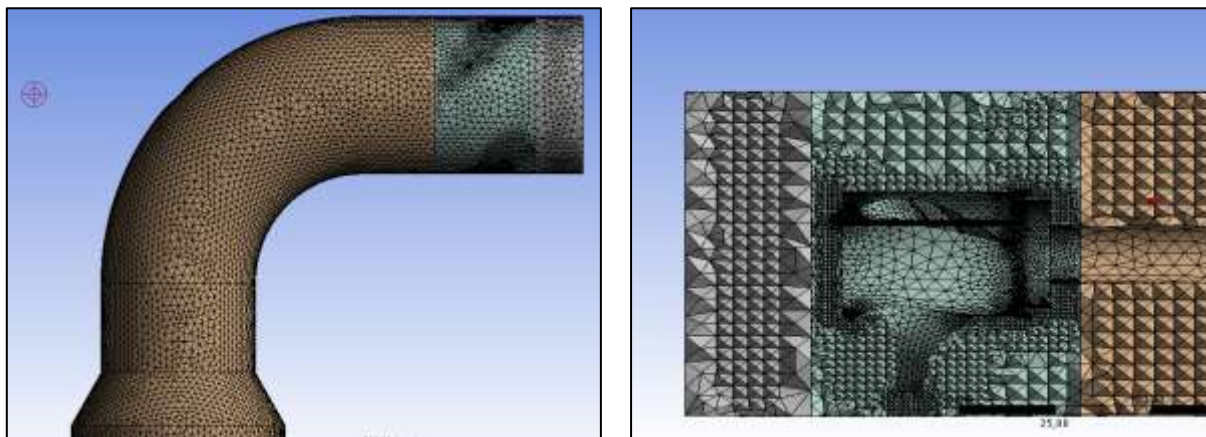
Para la relación de aspecto, se debe tener en cuenta tener un valor máximo por debajo de 30; y finalmente para la calidad ortogonal se requiere que sea lo más próxima a 1.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para lograr obtener la discretización que se requiere, generando una buena malla para el análisis fluido – dinámico, es necesario manipular una serie de variables y condiciones que permiten obtener los valores deseados para las características anteriormente definidas. Estas condiciones son tamaño de partícula, número de partículas, entre otros. (Zamora)

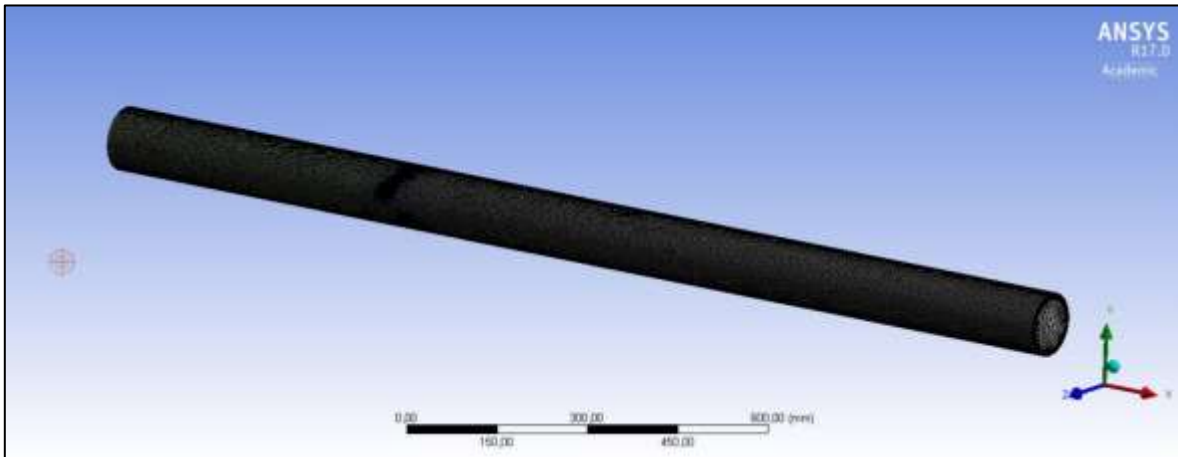


**Figura 22.** Malla geometría original.



**Figura 23.** Malla geometría original.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 24.** Malla geometría ideal.

### 3.2.2 Modelos de turbulencia

El flujo turbulento se caracteriza por contener partículas con movimiento caótico que generan trayectorias irregulares. Dentro de la mecánica de fluidos, existen diversos modelos para intentar reflejar el movimiento turbulento. En cada aplicación se debe equilibrar la precisión que se pueda alcanzar con un modelo y el esfuerzo computacional requerido. Los diversos modelos se clasifican en: aproximaciones de primer orden, aproximaciones de segundo orden y Large Eddy Simulation (LES). En el primer grupo de aproximaciones se distinguen: modelos algebraicos, de 1-ecuación y de n-ecuaciones. Los modelos de aproximaciones de primer y segundo orden tienen como raíz común las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Las ecuaciones base para la resolución de los problemas son las ecuaciones de continuidad, momento (Navier-Stokes) y Energía (en el problema a estudiar no se considerará). Reescribiendo dichas ecuaciones en notación inicial, se tiene para la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0$$

**Ecuación 16.** Ecuación de continuidad.

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

Y para la ecuación de momento o Navier-Stokes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j v_i) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

**Ecuación 17.** Ecuación de momento o Navier-Stokes.

La notación indicial determina que  $v_i$  es  $u$  si  $i = 1$ , es  $v$  si  $i = 2$  y es  $w$  si  $i = 3$ . Del mismo modo aplica a las demás variables que se definen por componentes como para  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ . En tanto  $\tau_{ij}$  es el esfuerzo de corte.

### 3.2.1 Modelo $k - \epsilon$

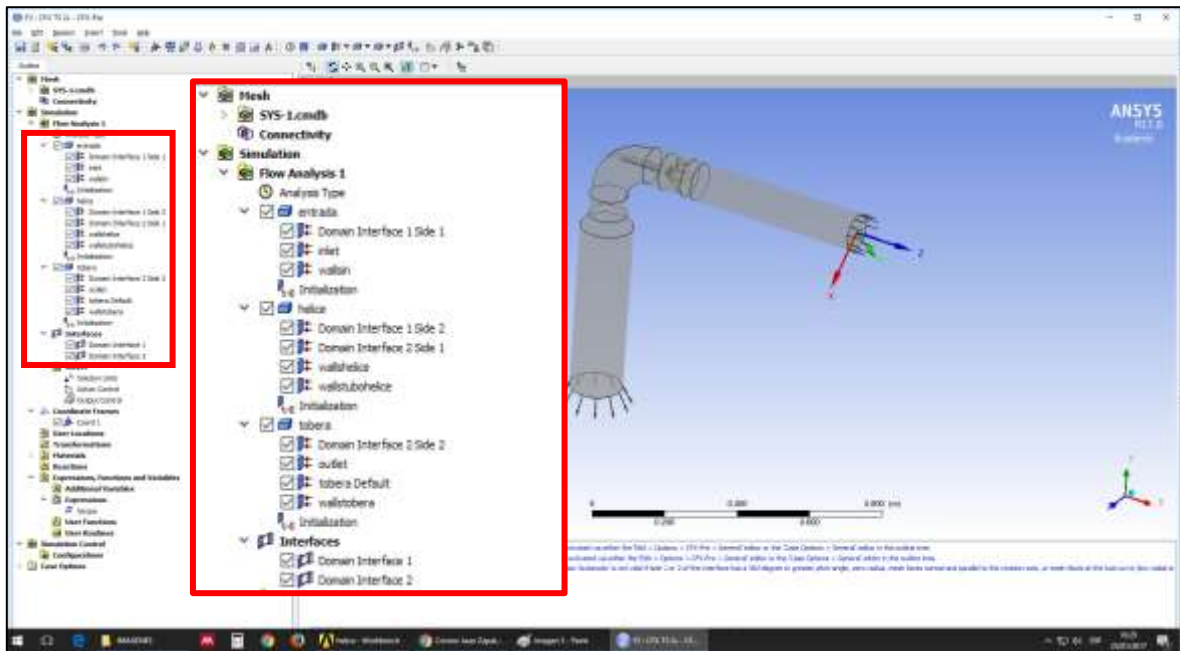
El modelo utilizado en este trabajo corresponderá al modelo de aproximación de 2 ecuaciones  $k - \epsilon$ . La elección por este modelo se basa en sus buenas características para modelar flujo turbulento y tratar las capas límite con suficiente resolución. El modelo  $k - \epsilon$  corresponde al más utilizado para modelar turbulencia. El nombre del modelo representa las variables que se introducen en estas dos ecuaciones:  $k$ , la energía cinética turbulenta y  $\epsilon$ , la tasa de disipación turbulenta. La tasa de disipación turbulenta corresponde a la tasa a la que la energía cinética turbulenta  $k$  es absorbida, transformando los eddies a otros más y más pequeños hasta que finalmente son transformados en calor por disipación viscosa [8]. (Zamora)

### 3.2.2 procedimiento de ajuste del modelo.

Este punto es en el cual se van a dar las condiciones de trabajo en las cuales se quiere simular el sistema, generando un ambiente similar al real.

Esta simulación se lleva a cabo el análisis de la turbomáquina usando el módulo CFX en el software ANSYS CFX 16.0®. En este se definen condiciones iniciales, fronteras e interfaces del fluido para luego aplicar el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ .

Se requiere definir interfaces de periodicidad rotacional por lo simple de la geometría. Para el análisis es importante la velocidad que se va a utilizar, pues es el punto básico para la simulación. En concordancia con lo anterior, para el presente proyecto se requiere una velocidad de rotación de la turbina tipo hélice de 900 RPM.



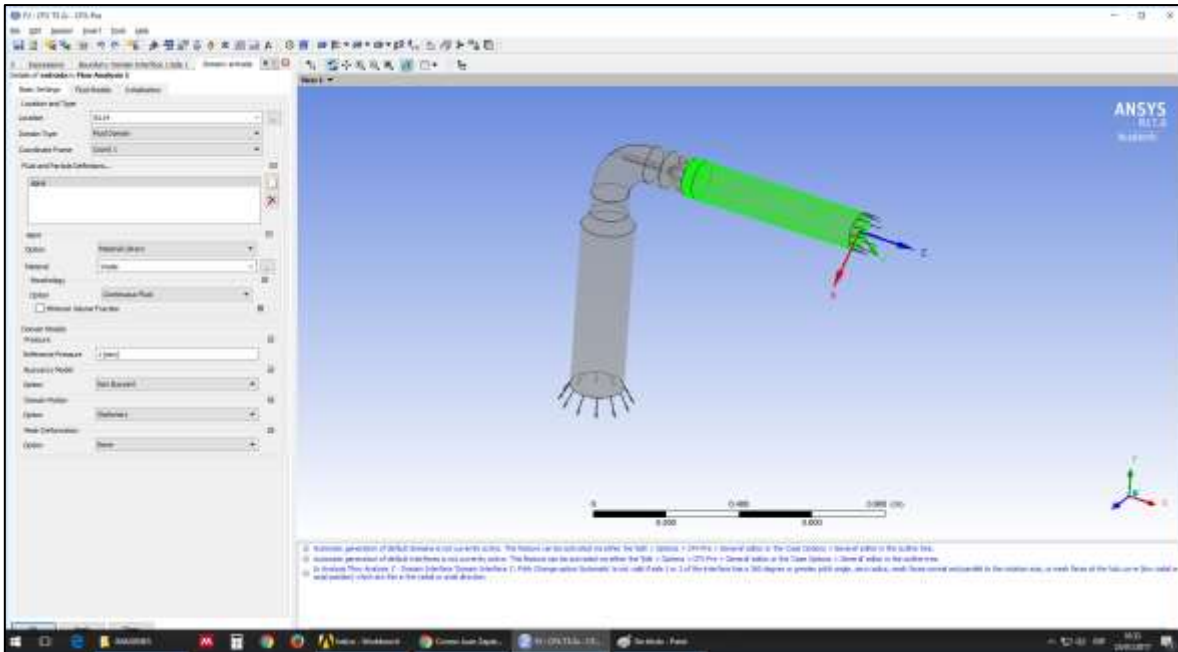
**Imagen 4.** Condiciones iniciales, fronteras e interfaces del fluido.

Como se muestra en la imagen 4, se definen las fronteras e interfaces del fluido, con el fin de determinar y definir presiones, velocidad de rotación de la turbina y velocidad del fluido.

En la imagen 5 se observa cómo se definen las condiciones iniciales para la entrada al sistema, en donde se especifica que el fluido que se está trabajando en la simulación es el agua y entra a presión de 1 atmósfera, aproximadamente la presión manométrica que existe en Medellín.

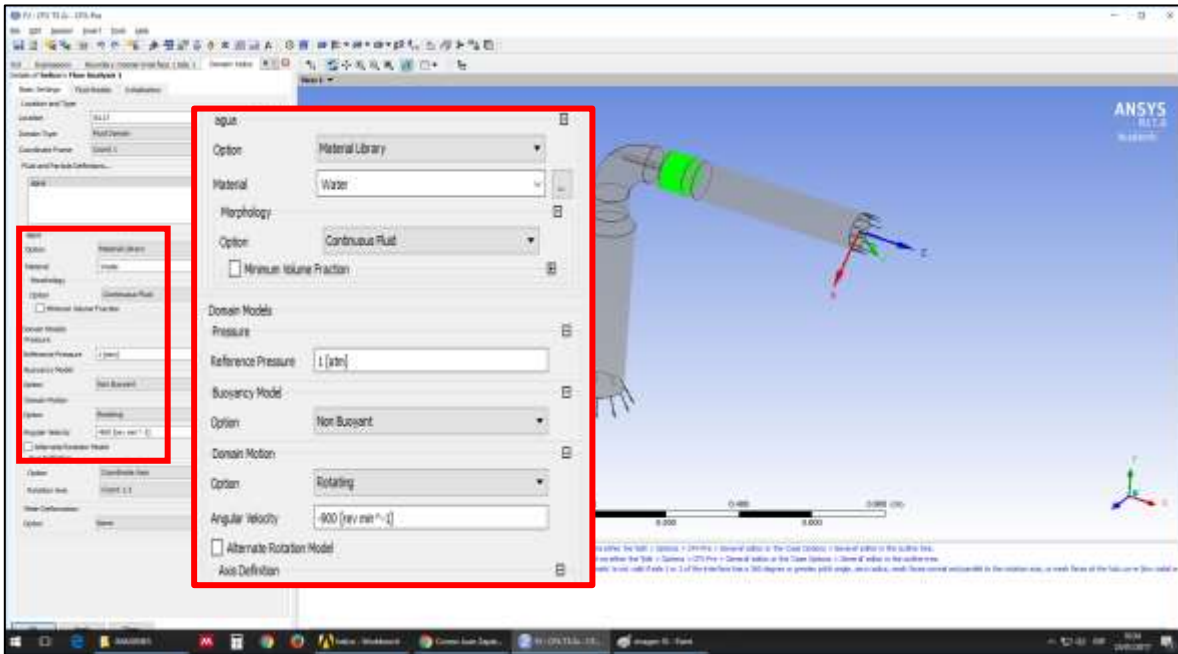


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



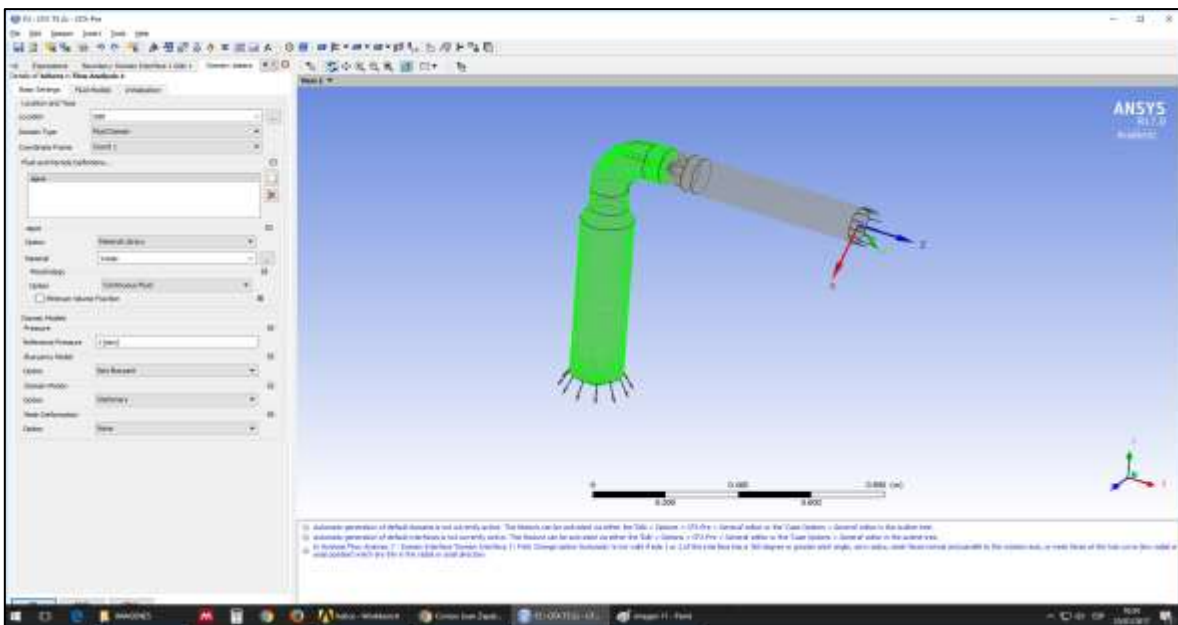
**Imagen 5.** Fronteras e interfaces del fluido. Tubo de entrada.

En la imagen 6 se observa cómo se definen las condiciones iniciales para la turbina del sistema, en donde se especifica que el fluido que se está trabajando en la simulación es el agua, entra a presión de 1 atmósfera y va a girar a una velocidad de -900 RPM.



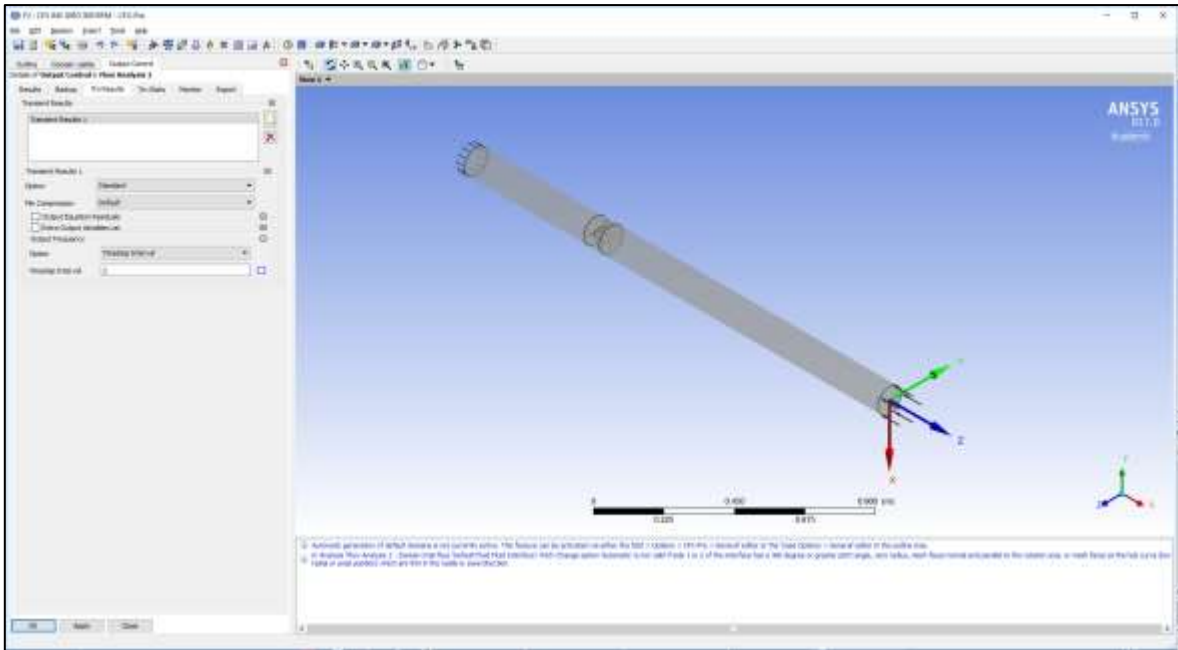
**Imagen 6.** Velocidad de giro de la turbina.

Por último, en la imagen 7 se definen las condiciones iniciales para la tubo de salida del sistema, en donde se especifica que el fluido que se está trabajando en la simulación es el agua y se trabaja a una presión de salida de 1 atmósfera.



**Imagen 7.** Fronteras e interfaces del fluido. Tobera.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Imagen 8.** Condiciones iniciales, fronteras e interfaces del fluido. Geometría ideal.

Luego que son definidos estas variables, se procede a realizar la simulación numérica del sistema. De esta simulación vamos a obtener datos básicos y tablas en las que se representan variables como el torque, velocidad, presión, potencia, entre otras.

### 3.2.3 Simulación numérica.

Una vez que han sido definidos los modelos de a utilizar, los contornos y se han definido las condiciones iniciales de trabajo, se procede con la simulación numérica de los sistemas.

Debido a las características del fluido que pasa a través del sistema se hace necesario utilizar el solver en modo transitorio, ya que las propiedades cambian con el tiempo.

Se ha utilizado un valor para el time step de 0.02 para 2 segundos. Al comenzar la simulación se nota que los resultados son inestables, y los cálculos comienzan a divergir. Con el paso

del tiempo y la cantidad de iteraciones, los cálculos comienzan a ser cada vez más similares, a tal punto de los cálculos se estabilizan de gran manera, es decir, no existe un cambio significativo con el paso del tiempo.

En las simulaciones numéricas es normal encontrar contraflujo, esto debido al primer instante en el cual el flujo entra en contacto con el rodete. Este contra flujo tiende a desaparecer a medida que pasan las iteraciones de cálculo.

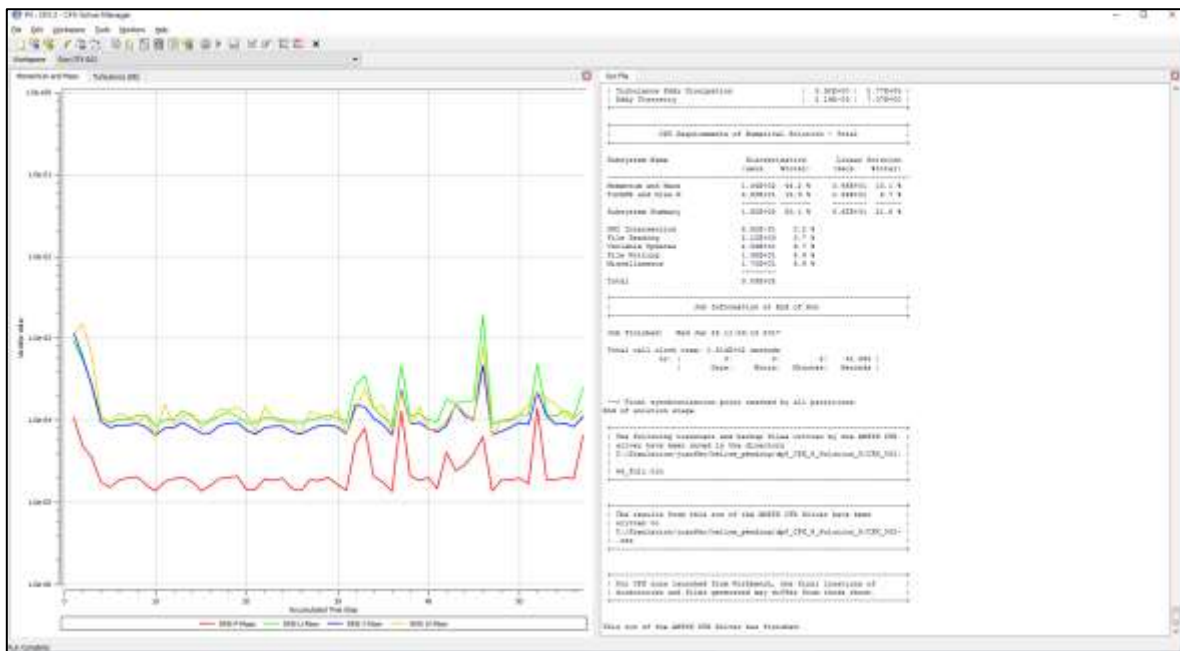
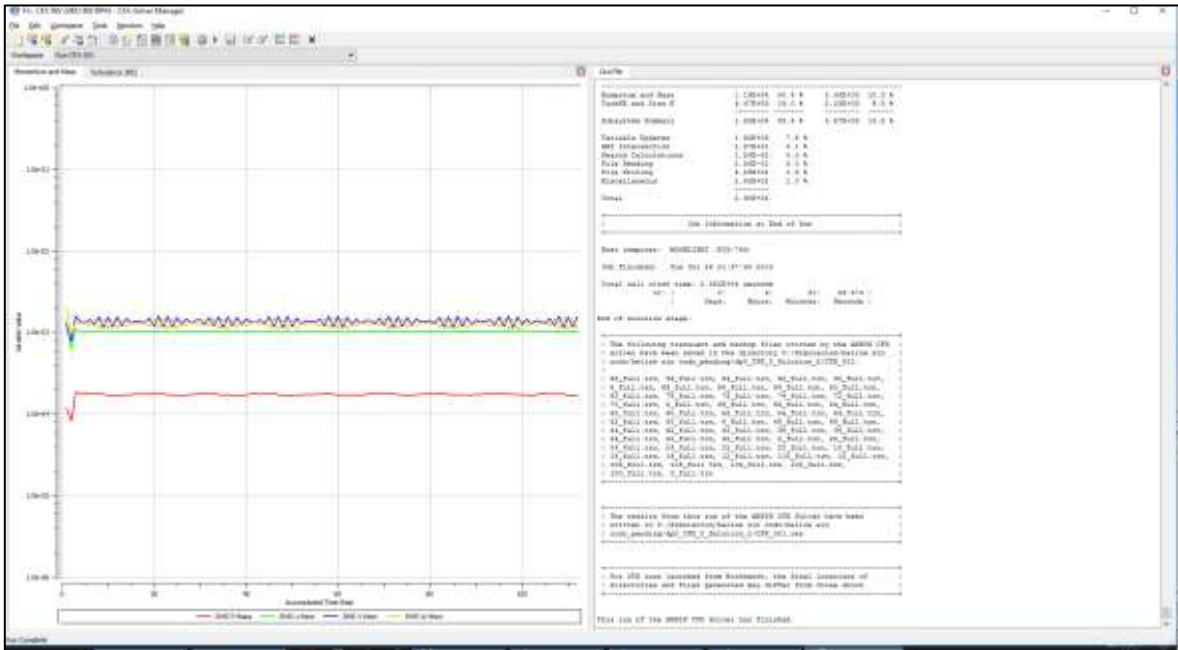


Imagen 9. Simulación numérica geometría original.



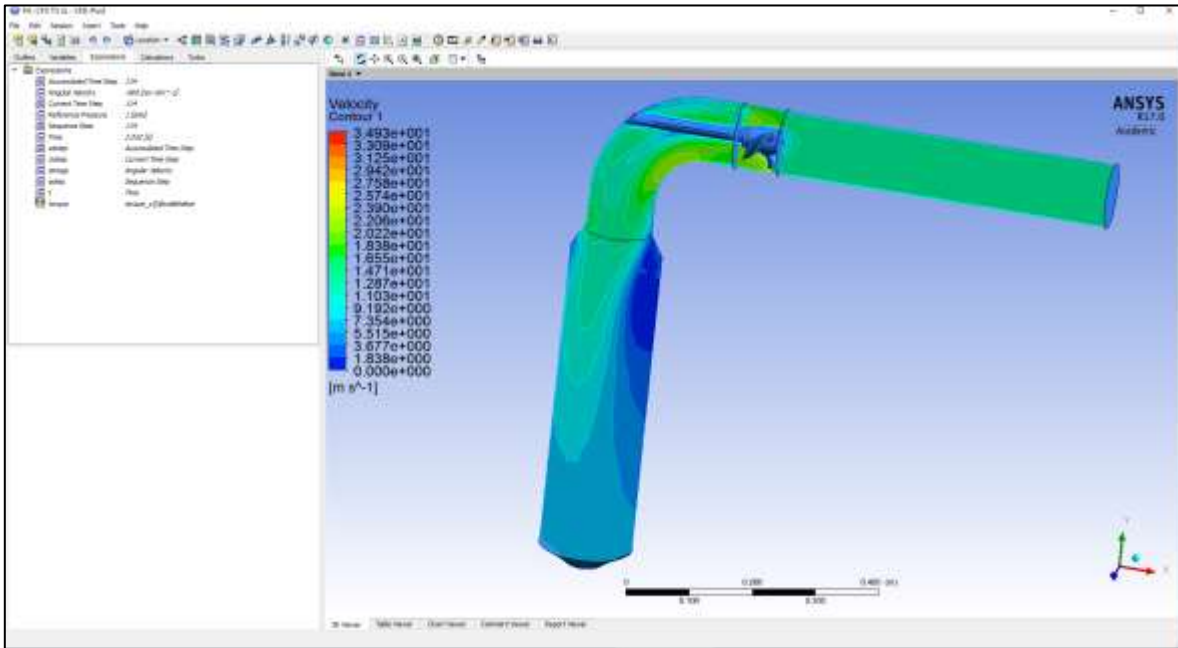
**Imagen 10.** Simulación numérica geometría ideal.

Se puede observar que es mayor la divergencia para la simulación numérica en la geometría ideal, ya que las pérdidas son menores al no tener en sus elementos constitutivos el codo y el eje del rodete.

### 3.2.4 Análisis de los resultados.

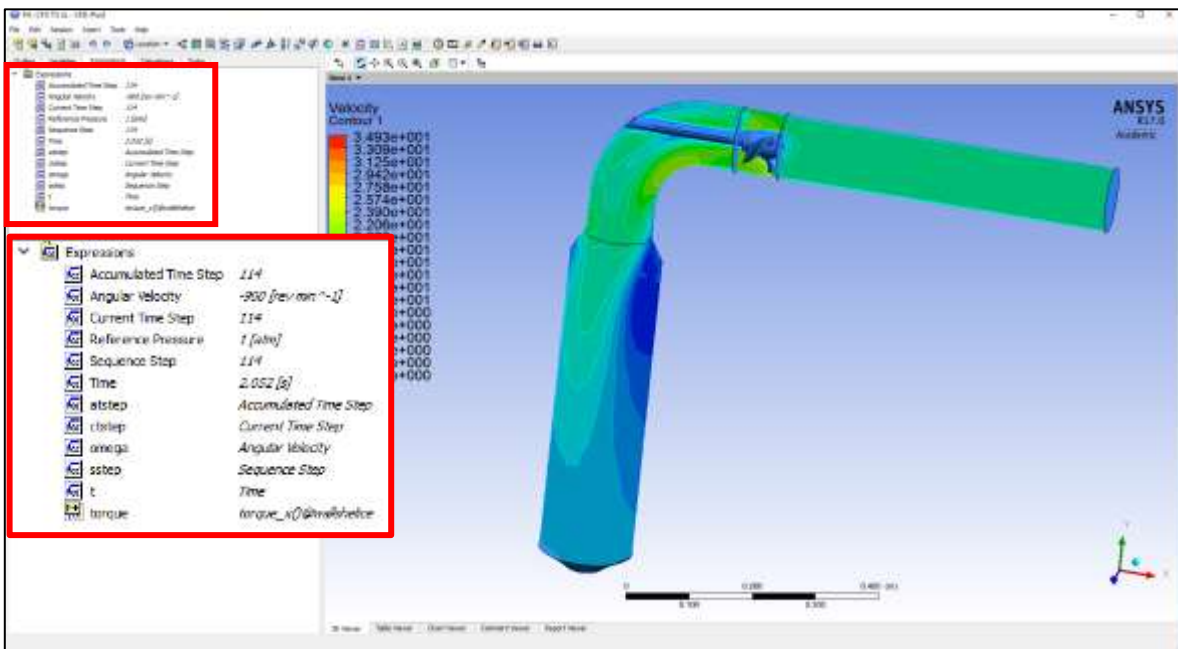
Luego de obtener los resultados es necesario interpretar los resultados a partir de herramientas que ofrece Fluent. De esta forma es posible observar los resultados a partir de contornos de presión, velocidad, entre otras variables a estudiar.

En la imagen 11 se describe uno de los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica. En este se puede observar la variación de la velocidad y el comportamiento del fluido una vez entra en contacto con el rodete de la turbina.



**Imagen 11.** Contorno de velocidad para malla de 1.6 millones de elementos.

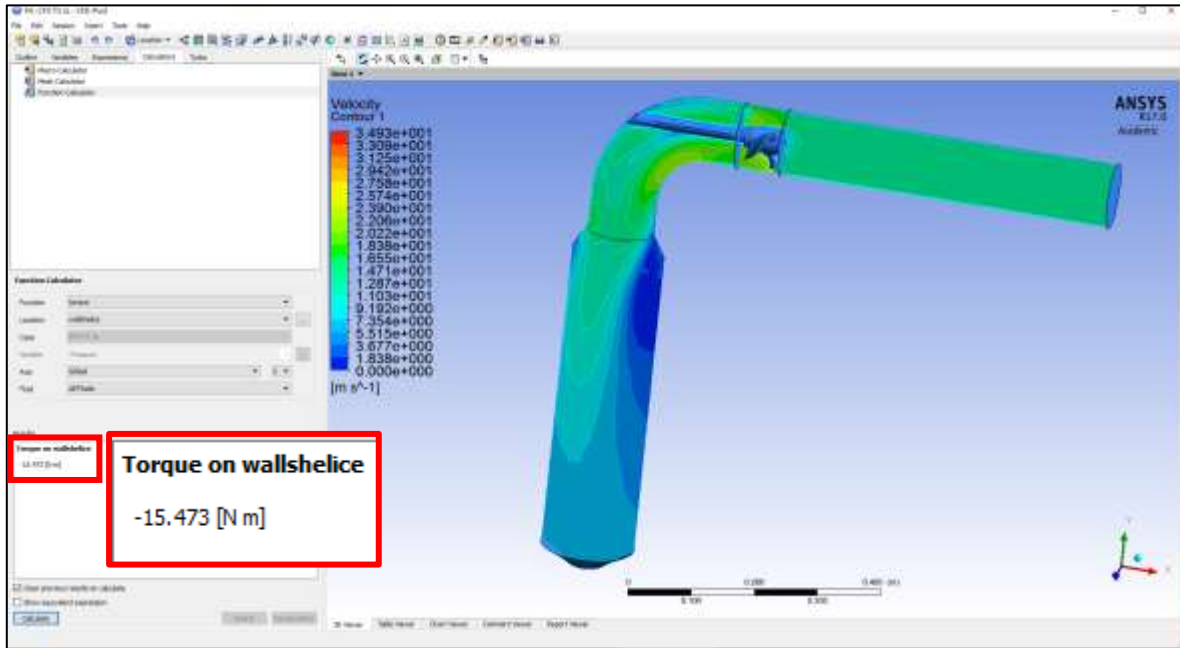
En la imagen 12 se describen las variables que fueron definidas para el inicio de la simulación.



**Imagen 12.** Resultados simulación.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la imagen 13 se muestra el valor del torque que se obtuvo a partir de las simulaciones numéricas.



**Imagen 13.** Resultado del torque calculado.

En la imagen 14 se muestra un estudio de mallas que se realizó para la geometría original, esto con el fin de obtener una malla que se me adapte más a los parámetros anteriormente definidos y que generen un estudio más ajustado a las condiciones reales a las cuales se ve enfrentado el sistema.

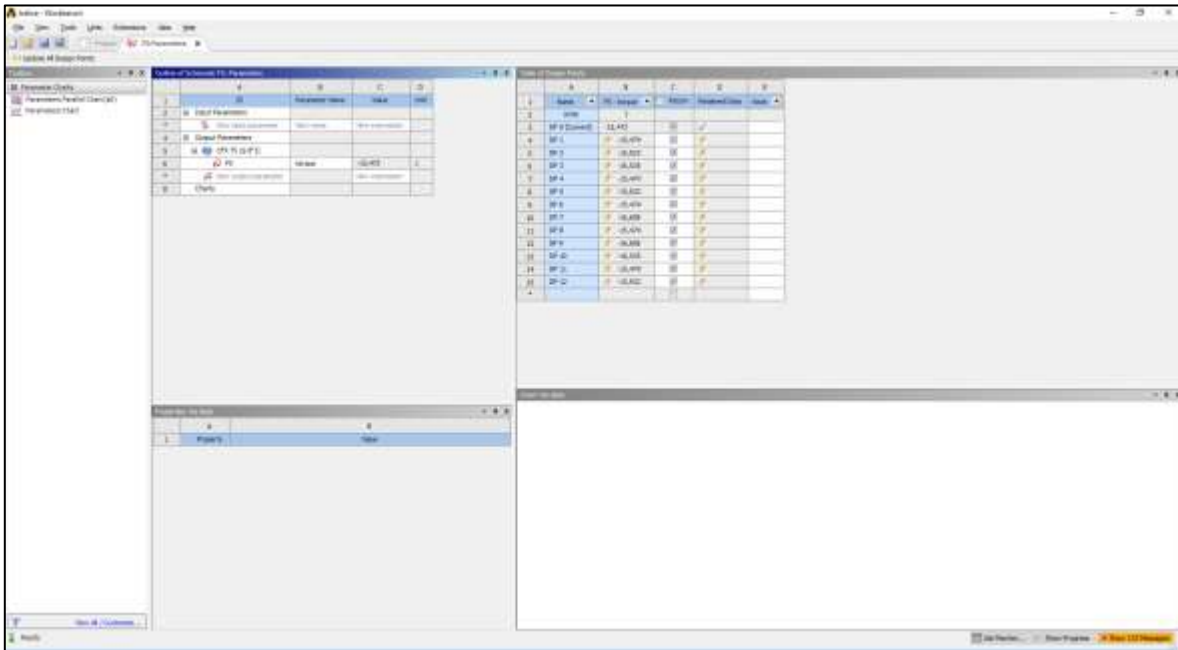


Imagen 14. Estudio de mallas.

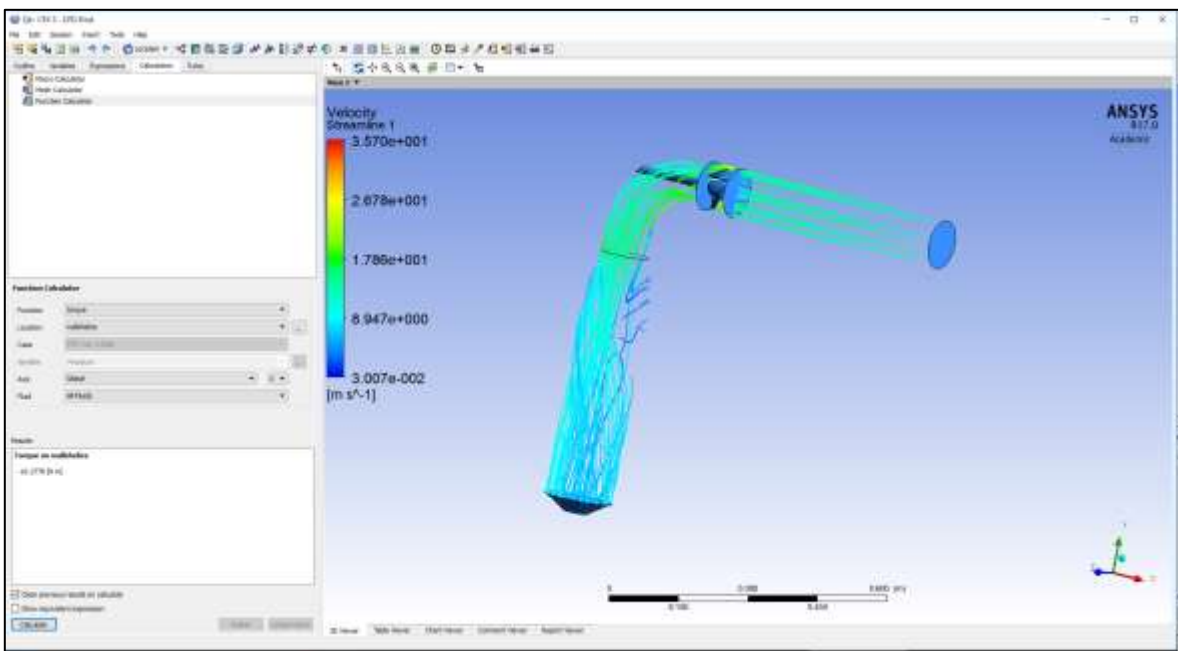
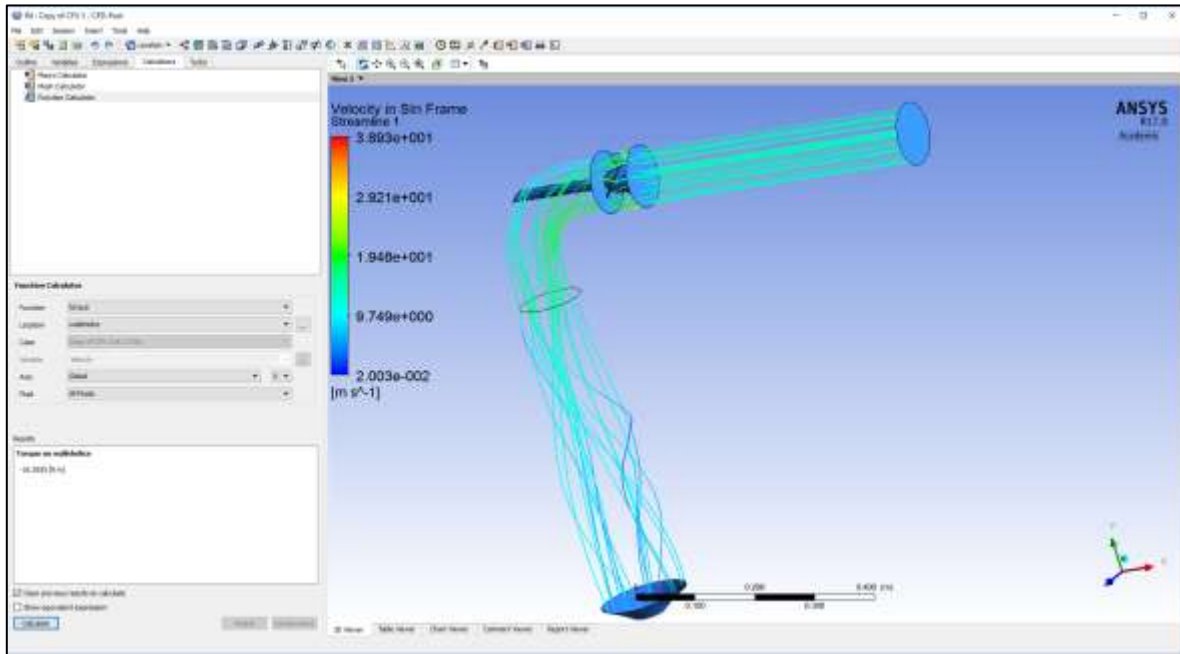
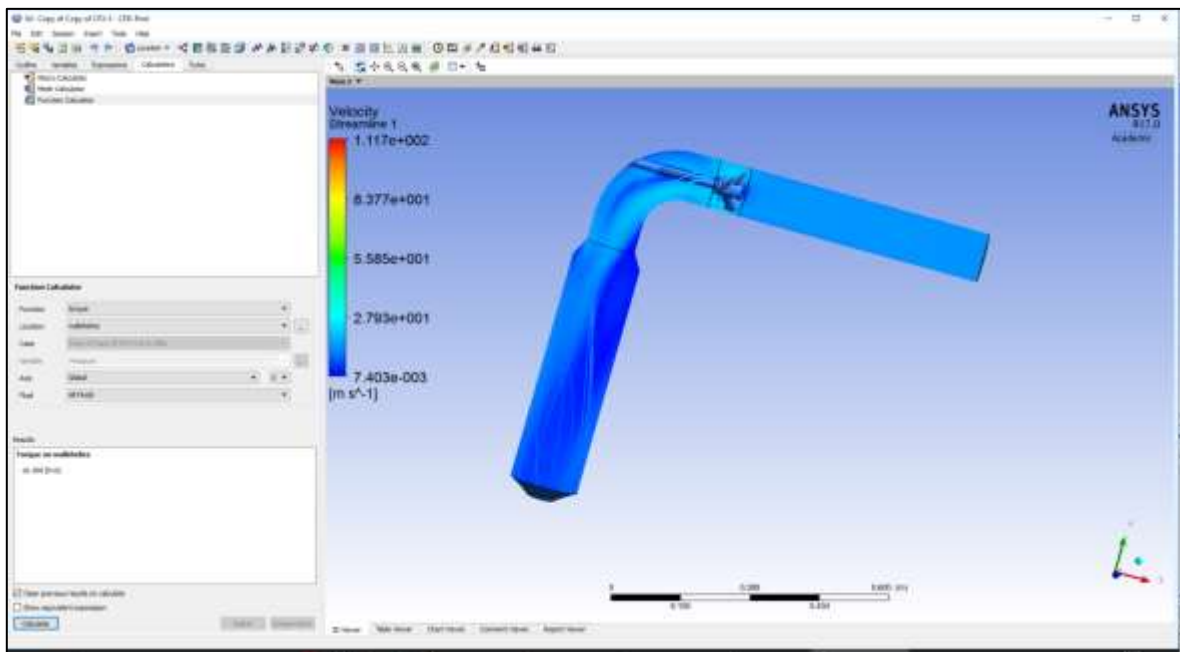


Imagen 15. Contorno de velocidad para malla de 1.8 millones de elementos.

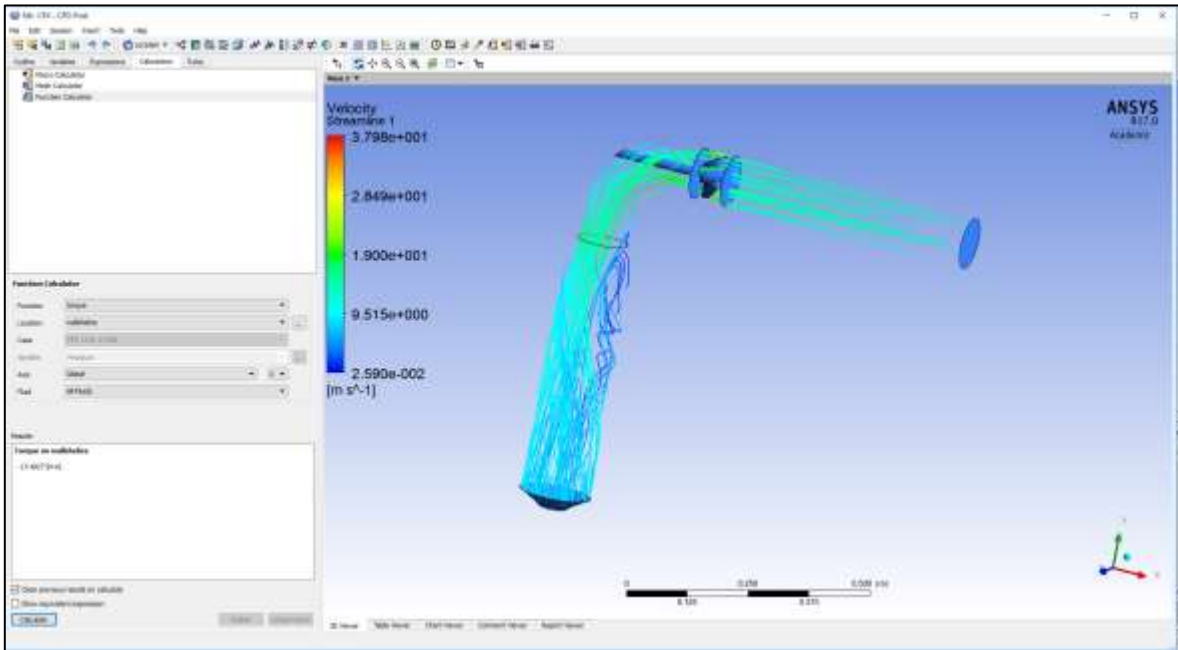




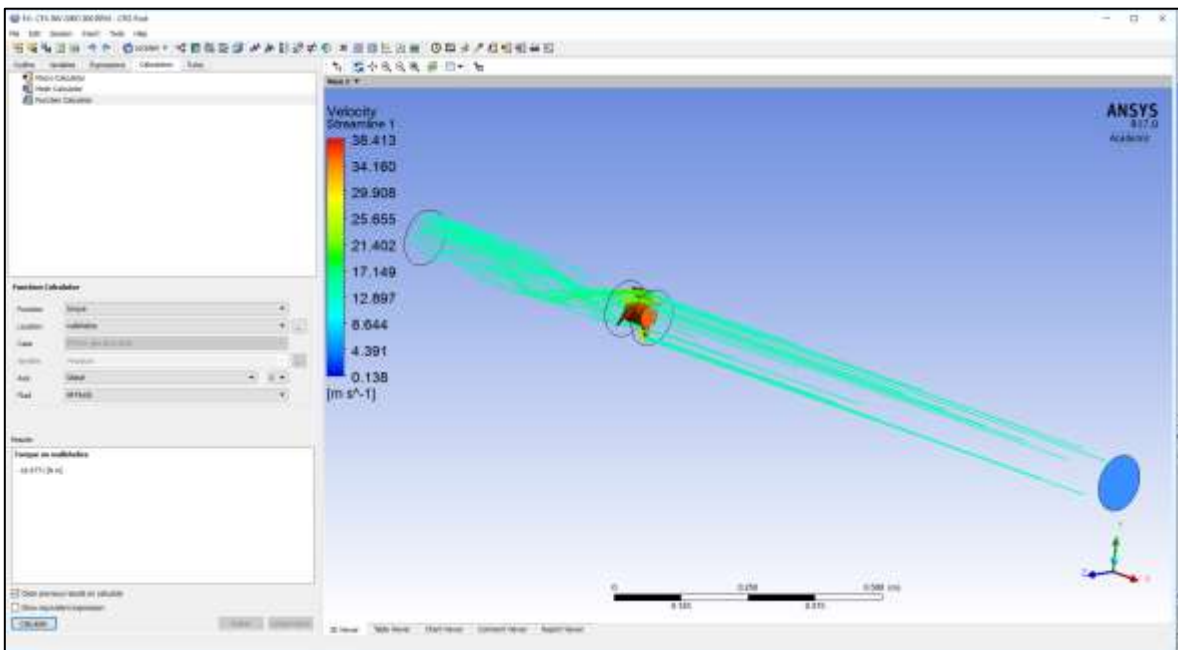
**Imagen 16.** Contorno de velocidad para malla de 2.5 millones de elementos.



**Imagen 17.** Contorno de velocidad para malla de 3 millones de elementos.



*Imagen 18. Contorno de velocidad para malla de 900 mil elementos.*



*Imagen 19. Contorno de velocidad para geometría ideal.*

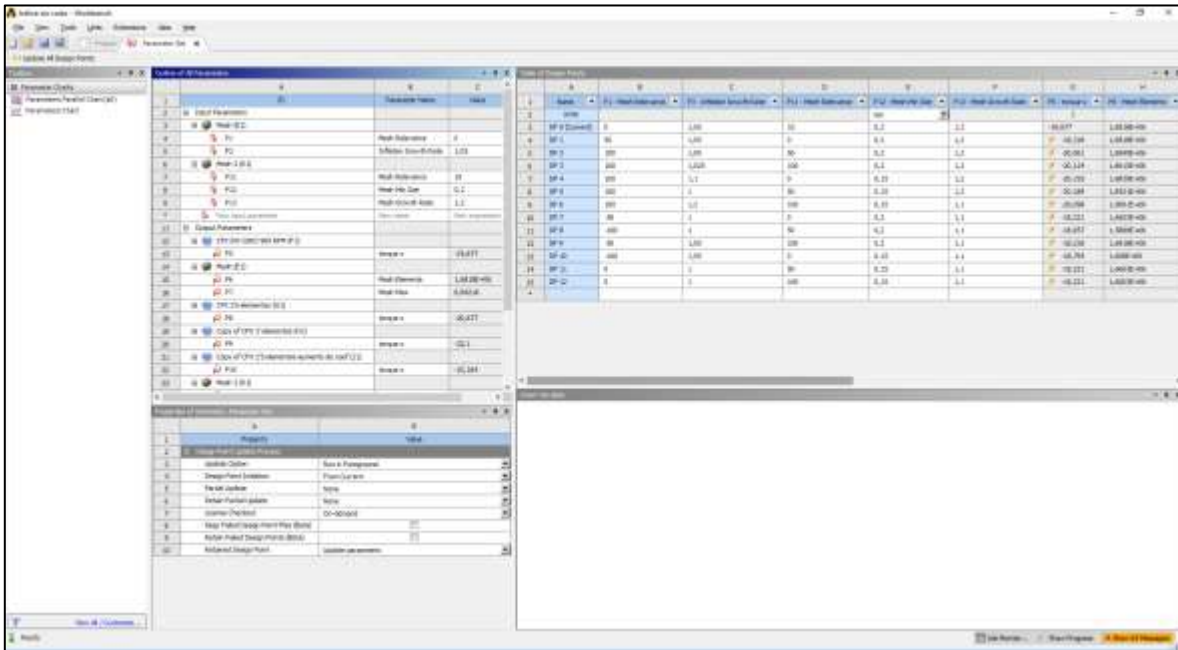


Imagen 20. Estudio de mallas para geometría ideal.

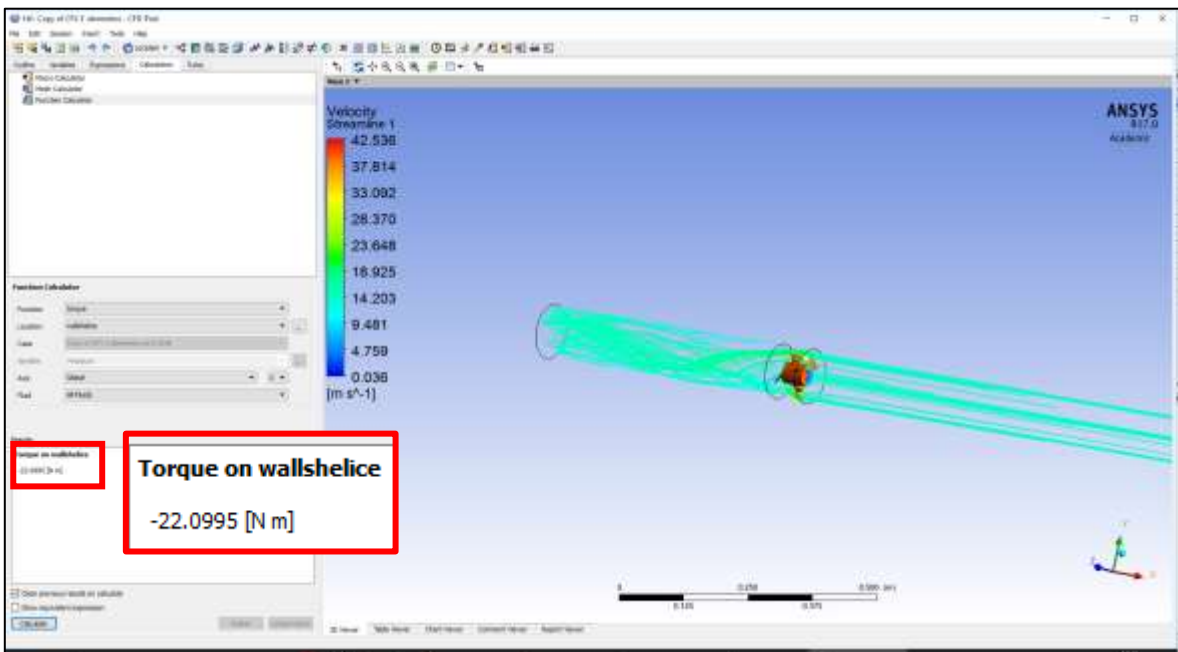


Imagen 21. Torque calculado.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1 Introducción

Como se ha expresado anteriormente, para este proyecto se realizaron diferentes simulaciones para las 2 geometrías descritas anteriormente, con el fin de obtener una serie de resultados que permitan obtener un resultado conforme a lo esperado, para validar los cálculos teóricos que se tienen.

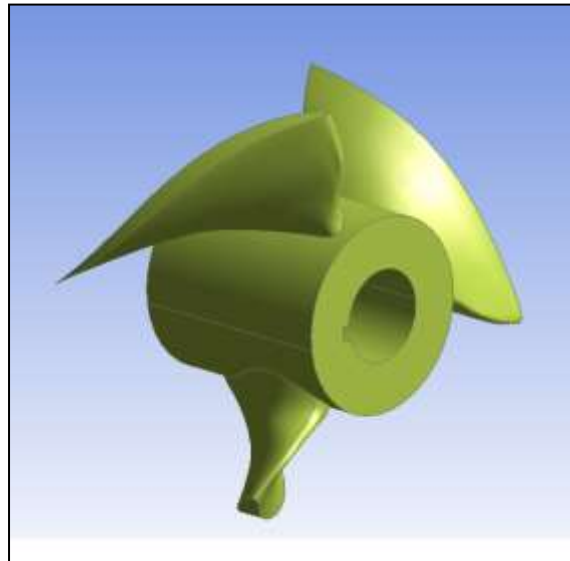
La turbina tipo hélice para validación hace parte de un sistema instalado en la universidad de Antioquia, para la cual se ha desarrollado el proyecto por parte del grupo GEA-Universidad de Antioquia, quienes a su vez suministraron el modelo CAD del ensamble completo del sistema. A continuación, se muestran las características completas de la hélice a trabajar:

CARACTERISTICAS	VALORES	UNIDADES
Caudal	0,1214	m <sup>3</sup> /s
Velocidad de rotación	900	rpm
Cabeza	4	m
Diámetro cubo	41,25	mm
Velocidad fluido	0,723	m/s
Ángulo de ataque	15	grados

**Tabla 4.** Características geométricas y de operación de la hélice. Fuente: Grupo GEA Universidad de Antioquia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El rodete de la turbina que se va a simular se muestra a continuación, en la figura:



**Figura 26.** Rodete de la turbina tipo hélice.

El modelo CAD fue proporcionado desde el grupo GEA de la U de A, y fue creado desde el software Solidworks, programa de diseño asistido por ordenador (CAD), en donde se realizó el modelado completo de la turbina tipo hélice todos los elementos constitutivos del sistema.

#### **4.2 Geometría ideal.**

Para el presente proyecto se hace indispensable trabajar con los valores del torque generado en el eje del rodete, ya que a partir de estos datos podemos llegar a la potencia teórica generada por la turbina para un trabajo constante a 900 RPM.

A continuación, se muestran los resultados para la simulación de la geometría ideal:

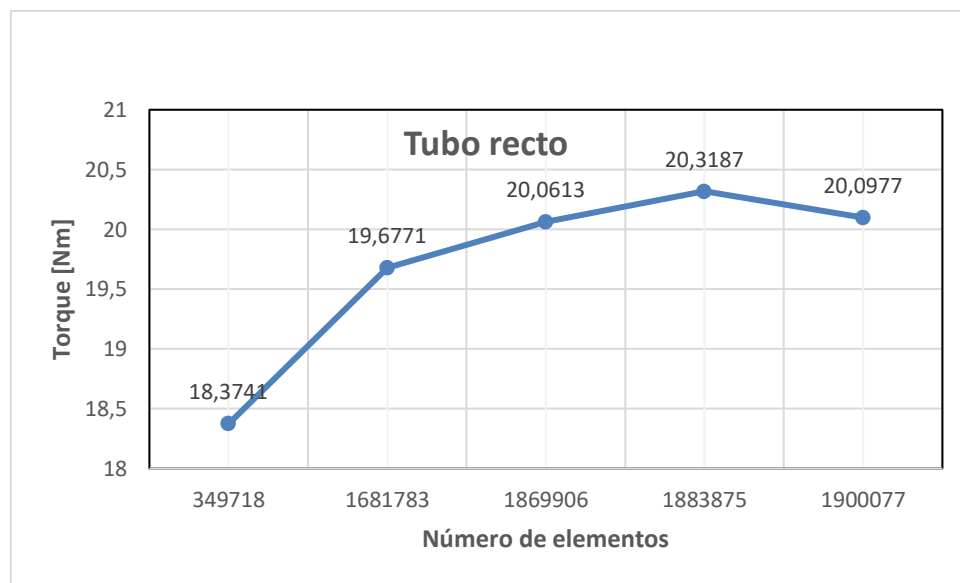
Mesh relevance	Inflation Grow Rate	Torque	Unidades	Mesh Elements	Mesh Max
10	1	-18,3741	Nm	349.718	0,604
0	1,05	-19,6771	Nm	1.681.783	0,842
100	1,05	-20,0613	Nm	1.869.906	0,849
100	1	-20,3187	Nm	1.852.142	0,897
100	1,2	-20,0977	Nm	1.900.077	0,872

**Tabla 5.** Estudio de mallas para geometría ideal.

Este estudio se realiza con el fin de encontrar que el cálculo converja al valor que se requiere, con el fin de obtener el valor del torque generado por la turbina, y de esta forma encontrar la potencia generada por la misma.

Como se observa en la tabla, el valor del torque llega a un punto en el cual el cambio es inferior al 1% respecto al cambio del número de elementos, por tal motivo se concluye que existe convergencia en los cálculos, y por lo cual se puede trabajar con una de las mallas obtenidas.

La convergencia se muestra en la gráfica 1.



**Gráfico 1.** Estudio de mallas geometría ideal.

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

A partir del torque encontrado, se puede calcular la potencia que se genera para la geometría ideal:

$$P = T * RPM$$

$$P = 20.3187Nm * 900RPM$$

$$P = 1.9kW$$

Como se observa, la potencia generada por una geometría donde las condiciones son ideales, y las pérdidas no son significativas, la potencia generada es ideal, por tal motivo se encuentra que la potencia teórica es naturalmente, similar a la calculada, en un ambiente en el cual todas las características y condiciones son ideales.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4.2 Geometría original

Para el presente proyecto se hace indispensable trabajar con los valores del torque generado en el eje del rodete, ya que a partir de estos datos podemos llegar a la potencia teórica generada por la turbina para un trabajo constante a 900 RPM.

A continuación, se muestran los resultados para la simulación de la geometría original:

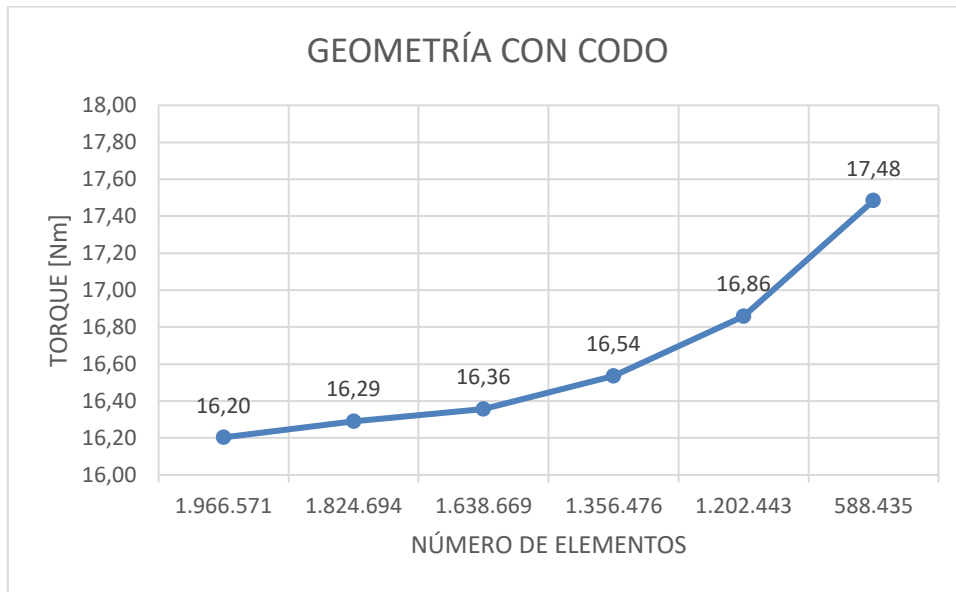
Mesh Relevance	Inflation grow rate	# Elementos	Mesh Max	Torque
100	1,05	2.324.445	0,906	-16,25
100	1,15	1.966.571	0,899	-16,20
100	1,15	1.824.694	0,895	-16,29
100	1,15	1.638.669	0,895	-16,36
0	1,1	1.356.476	0,899	-16,54
-100	1,05	1.202.443	0,898	-16,86
0	1,15	588.435	0,908	-17,48

**Tabla 6.** Estudio de mallas para geometría original.

Este estudio se realiza con el fin de encontrar que el cálculo converja al valor que se requiere, con el fin de obtener el valor del torque generado por la turbina, y de esta forma encontrar la potencia generada por la misma.

Como se observa en la tabla, el valor del torque llega a un punto en el cual el cambio es inferior al 1% respecto al cambio del número de elementos, por tal motivo se concluye que existe convergencia en los cálculos, y por lo cual se puede trabajar con una de las mallas obtenidas.





**Gráfico 2.** Estudio de mallas geometría ideal.

A partir del torque encontrado, se puede calcular la potencia que se genera para la geometría ideal:

$$P = T * RPM$$

$$P = 16.20Nm * 900RPM$$

$$P = 1.45kW$$

Como se observa, la potencia generada por una geometría donde las condiciones no son ideales, y las pérdidas son significativas, la potencia generada se ve drásticamente reducida, por tal motivo se encuentra que la potencia teórica es naturalmente, superior a la calculada, en un ambiente en el cual todas las características y condiciones genera pérdidas.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Al partir de una geometría diseñada con base a un sistema existente, con el fin de analizar el funcionamiento y llegar a conocer la potencia generada por la turbina, se hace necesario realizar un análisis fluido – dinámico del sistema para obtener los resultados y de esta forma validar que la potencia teórica es similar a la calculada a partir del estudio.

Básicamente la idea del proyecto es validar numéricamente mediante simulaciones computacionales la eficiencia de las correlaciones teóricas disponibles en la literatura para el diseño hidráulico de turbinas de hélice y a partir del estudio, se puede concluir que los resultados tienen un gran sentido físico y aceptable, debido a que la potencia teórica se basa desde un comportamiento teórico, en el cual se tiene un ambiente completamente ideal, en el cual las pérdidas por fricción, por constitución del sistema y por otros factores asociados al medio de trabajo, son insignificantes, por tal motivo la potencia calculada es tan alta.

Por tal motivo, a modo de resumen se puede concluir que, se obtiene que la turbina logre extraer energía de la alta velocidad del fluido, logrando una caída de presión entre la entrada y la salida de la misma. Pero la alta velocidad y la buena incidencia del fluido en los álabes del rotor, no logran mitigar de gran forma las pérdidas del sistema, ya que el diseño no es el más óptimo debido a la construcción del sistema; esto por la cantidad de cuerpos que se interponen al flujo constante del fluido.

Por esto, se genera solo 1.4 kW de potencia, un 70% de la eficiencia esperada.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A partir de este estudio se puede comenzar a realizar estudios y experimentación con el fin de mejorar el sistema, y, por ende, aumentar la eficiencia de la turbina.

Además, es importante realizar una validación entre los resultados obtenidos a partir de la validación numérica respecto al comportamiento en el ámbito real. (CFD vs Experimentación), esto sería un nuevo tema de experimentación para desarrollar con el fin de encontrar las mejoras que requiere el sistema.

También es posible mejorar la geometría del rodete, con el fin de mejorar la incidencia del flujo a través de los álabes y de esta forma mejorar su eficiencia.

Como se observa, resultan varias sugerencias a partir del estudio fluido – dinámico realizado.

Cabe recordar que estas sugerencias no hacían parte del proyecto, ya que la finalidad de esta etapa era validar la teoría con el estudio numérico de la turbina.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

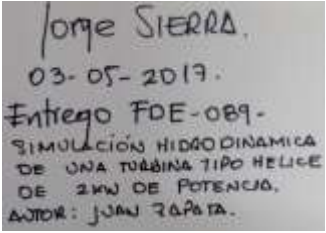
---

- Leon, J., Riveros, V., (2008). Diseño, construcción, montaje y operación de una turbina Pelton. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de ingenierías y administración. Bucaramanga, Colombia.
- [2]. Fernández, P. Turbinas hidráulicas. Universidad de Cantabria. Dpto de ingeniería eléctrica y energética. Cantabria, España.
- Cordón, R., (2012). Caracterización de una turbina axial y creación de aplicación gráfica para procesamiento de datos. Universidad de Jaén. Dpto ingeniería mecánica y minera. Andalucía, España.
- Rivetti, A., Lucino, C., Torres, J., Liscia, S., (2010). Modelación en CFD de una turbina Kaplan y comparación con resultados experimentales. Universidad Nacional de La Plata. 1-9.
- Dragica, J., Skerlavaj, A., Lipej, A. (2014). Improvement of efficiency prediction for a kaplan turbine with advanced turbulence models. Journal of Mechanical Engineering, 60(2), 124 – 134.
- Dongho, K., Keunhwa, L., Woojae, S. (2014). Non-cavitating propeller noise modeling and inversion. Journal of Sonud and Vibration. 333, 6424 – 6437.
- Sanchez, C., Cardona, C., Hincapié, D. (2015). Metodología de diseño y simulación hidrodinámica de una microturbina tipo kaplan usando herramientas computacionales. Instituto Tecnológico Metropolitano. 1 – 7.
- Rossgatterer, M., Juttler, B., Dela Vecchia, G. (2012). Medial desing of blades for hydroelectric turbines and ship propellers. Computer and Graphics, 36, 434 – 444.
- Turbinas hidráulicas. Centrales Hidráulicas. Universidad de Antioquia.
- Perez, P. Generacion Kaplan tubular. Pontificia Universidad católica del Perú. Lima, Perú.
- Velez, S., Sierra, J. (2015). Análisis numérico de la influencia del ángulo de apertura de la cresta del cangilón en el torque generado por una turbina Pelton. Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. 1 – 8.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Juan Fernando Zapata

---



FIRMA ASESOR \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: 03-05-2017

“Primera entrega del informe final de trabajo de grado para evaluación”

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: \_\_\_\_\_