



# *Diseño de una máquina axial para recuperación energética en una depuradora.*

---

**MEMORIA PRESENTADA POR:**  
*Jorge Tomás Pastor*

GRADO DE *INGENIERÍA MECÁNICA*

Convocatoria de defensa: [Julio 2019]



# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
3. MICRO HIDRÁULICA .....	9
4. FUNDAMENTOS DE TURBOMÁQUINAS.....	10
4.1. Introducción.....	10
4.2. Fundamentos .....	11
4.2.1. Fluido newtoniano.....	11
4.2.2. Líneas de corriente .....	11
4.2.3. Método de análisis unidimensional .....	12
4.2.4. Régimen laminar y turbulento .....	13
4.2.5. Ecuación de Bernoulli .....	14
4.2.6. Triángulos de velocidad.....	15
4.2.7. Ecuación de Euler.....	16
4.3. Definición de máquina hidráulica y clasificación .....	18
5. TURBINAS.....	19
5.1. Definición de turbina y clasificación.....	19
5.1.1. Clasificación según grado de reacción ( $\epsilon T$ ) .....	19
5.1.2. Clasificación según la dirección del flujo .....	19
5.1.3. Gráfico altura-caudal .....	20
6. TURBINAS DE HÉLICE.....	20
6.1. Introducción.....	20
7. ESTACIONES DEPURADORAS .....	21
7.1. Introducción.....	21
7.2. Consumo energético .....	21
7.3. Volúmenes tratados .....	22
8. IMPORTANCIA DEL CFD.....	23
9. FUNDAMENTOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES.....	25
9.1. Tensión .....	25
9.2. Elasticidad y plasticidad .....	25
9.3. Ley de Hooke y módulo de Young .....	25
9.3.1. Ley de Hooke.....	25
9.3.2. Módulo de Young.....	26



9.4. Modulo de cizalladura .....	26
10. CONDICIONES DE LA INSTALACIÓN .....	27
10.1. Situación inicial .....	27
11. METODOLOGÍA .....	28
12. PARÁMETROS DE LA INSTALACIÓN.....	29
12.1. Potencia hidráulica máxima .....	29
12.2. Selección de generador .....	29
12.3. Parámetros de la instalación.....	29
12.3.1. Velocidad de sincronismo de los motores .....	29
12.3.2. Velocidad para que el motor trabaje como generador.....	30
12.3.3. Potencia eléctrica .....	31
13. OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA TURBINA.....	34
13.1. Diseño de la turbina en CAD.....	35
14. SIMULACIÓN CFD .....	35
14.1. Ensamblaje .....	35
14.2. Configuración de datos iniciales .....	36
14.3. Configuración de condiciones de la instalación: .....	40
14.4. Resultados CFD.....	41
15. SELECCIÓN DE MATERIAL .....	42
16. PRESUPUESTO.....	42
17. CONCLUSIONES .....	43
18. REFERENCIAS .....	45



## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1 Esquema del sentido de transmisión de la energía en turbomáquinas generadoras y motoras .....	11
Figura 2 Clasificación de turbomáquinas .....	11
Figura 3 Esquema de una línea de corriente.....	12
Figura 4 Hilo de corriente en un tubo de corriente .....	12
Figura 5 Esquema de un análisis unidimensional .....	12
Figura 6 Descripción gráfica flujo laminar y turbulento.....	13
Figura 7 Velocidades a la entrada y salida del rodete.....	15
Figura 8 Triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del rodete.....	15
Figura 9 Descomposición del vector velocidad absoluta .....	16
Figura 10:Clasificación máquinas hidráulicas.....	18
Figura 11 Rangos caudal-altura según tipo de turbina.....	20
Figura 12 Turbina de hélice.....	20
Figura 13 Potencia requerida por unidad de tratamiento .....	21
Figura 14 Consumo de energía a nivel internacional .....	22
Figura 15 Volúmenes de aguas residuales tratadas en la Comunidad Valenciana .....	22
Figura 16 Volumen de agua tratada en España por año.....	22
Figura 17 Ejemplo de CFD en industria aeronáutica.....	23
Figura 18 Ejemplo de CFD ventilación .....	24
Figura 19 Ejemplo de CFD en la industria hidroeléctrica .....	24
Figura 20 Tensión normal y tensión tangencial .....	25
Figura 21 Diagrama de un esfuerzo cortante .....	26
Figura 22 Diagrama de la instalación .....	27
Figura 23 Diagrama de flujo de las diferentes etapas del proyecto.....	28
Figura 24 Curva caudal altura .....	32
Figura 25 Curva velocidad específica y altura.....	33
Figura 26 Dimensiones generales.....	34
Figura 27 Resumen del diseño de los álabes.....	34
Figura 28 Vista lateral turbina.....	35
Figura 29 Vista frontal y en perspectiva turbina .....	35
Figura 30 Vista lateral del ensamblaje .....	35
Figura 31 Ensamblaje en perspectiva .....	36
Figura 32 Mallado de la turbina .....	36
Figura 33 Detalles de la malla .....	37
Figura 34 Flow Simulation, ajustes generales: Tipo de análisis .....	38
Figura 35 Flow Simulation, ajustes generales: Fluidos .....	38
Figura 36 Flow Simulation, ajustes generales: Rugosidad.....	39
Figura 37 Flow Simulation, ajustes generales: Condiciones iniciales.....	39
Figura 38 Dominio computacional.....	40
Figura 39 Condiciones de contorno.....	40
Figura 40 Región rotativa .....	41
Figura 41 Trayectoria del fluido a lo largo de la conducción .....	41
Figura 42 Ensamblaje completo .....	44



## RESUMEN

Durante las últimas décadas el consumo de energía a nivel global está aumentado de manera considerable. Para atender a la demanda se utilizan fuentes de energía no renovables, las cuales son responsables de la degradación del planeta así como de la extinción de los recursos naturales.

Es por ello que es necesario tender hacia formas más sostenibles de generar energía, en el caso de este proyecto se pretende generar energía mediante la micro hidráulica, un tipo de energía limpia y de bajo impacto en el medio ambiente.

El objetivo de este proyecto es diseñar una turbina de hélice a medida para un salto de agua determinado con el fin de obtener la mayor cantidad de energía posible. El caso de estudio se realiza para una depuradora de aguas residuales y para cualquier instalación con un salto de agua como el de estudio.

Este proyecto se basa en la obtención de las dimensiones de la turbina, el análisis del comportamiento mecánico mediante CFD (*Computational Flow Dynamics*), la selección del material, el método de fabricación y los elementos básicos del montaje.

Se pretende obtener un grupo generador compuesto por una turbina de hélice acoplada a un motor eléctrico a modo de generador.

**Turbina de hélice; Aprovechamiento de Energía; Diseño; CFD; Sostenibilidad**



## RESUM

Durant les últimes dècades el consum d'energia a nivell global està augmentat de manera considerable. Per a atendre la demanda s'utilitzen fonts d'energia no renovables, les quals són responsables de la degradació del planeta així com de l'extinció dels recursos naturals.

És per això que és necessari tendir cap a formes més sostenibles de generar energia, en el cas d'aquest projecte es pretén generar energia mitjançant la micro hidràulica, un tipus d'energia neta i de baix impacte en el medi ambient.

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar una turbina d'hèlix a mesura per a un salt d'aigua determinat amb la finalitat d'obtenir la major quantitat d'energia possible. El cas d'estudi es realitza per a una depuradora d'aigües residuals i per a qualsevol instal·lació amb un salt d'aigua com el d'estudi.

Aquest projecte es basa en l'obtenció de les dimensions de la turbina, l'anàlisi del comportament mecànic mitjançant CFD (*Computational Flow Dynamics*), la selecció del material, el mètode de fabricació i els elements bàsics del muntatge.

Es pretén obtenir un grup generador compost per una turbina d'hèlix acoblada a un motor elèctric a manera de generador.

**Turbina d'hèlix; Aprofitament d'Energia; Disseny; CFD; Sostenibilitat**



## Abstract

During the last decades, energy consumption has increased considerably globally. In order to attend this demand, non-renewable energy sources are used, which are responsible for the degradation of the planet as well as the extinction of natural resources.

That is why it is necessary to tend towards more sustainable ways of generating energy, in the case of this project it is intended to generate energy through micro hydropower, a type of clean energy with low impact on the environment.

The objective of this project is to design a custom propeller turbine for a specific water head in order to obtain the greatest possible amount of energy. The subject matter is carried out for a sewage treatment plant but also for any installation with a water head as the subject of study.

This project focuses on obtaining the dimensions of said turbine, the analysis of the mechanical behavior by means of CFD (Computational Flow Dynamics), the selection of the material, the manufacturing process and the basic elements of the assembly.

It is intended to obtain a generating group composed of a propeller turbine coupled to an electric motor working as a generator.

**Propeller turbine; Energy use; Design; CFD; Sustainability**



## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la humanidad sigue agotando los recursos del planeta sin pararse a buscar alternativas sostenibles o menos perjudiciales para el medio ambiente. Durante estas últimas décadas está creciendo la preocupación sobre este ámbito y cada vez más y más organizaciones son conscientes del peligro que supone no poner remedio a este problema.

El problema no solo reside en agotar los recursos materiales de la naturaleza sino también los recursos energéticos, el consumo energético en todo el mundo ha aumentado hasta un 600% en comparación con el siglo pasado. Esto es debido a un aumento de la población desde la revolución industrial, durante la cual toda la energía provenía de combustibles fósiles (Pérez-Sánchez, Sánchez-Romero, Ramos & López-Jiménez, 2017).

No se puede seguir dependiendo de los combustibles fósiles, el primer motivo es porque su extracción de la corteza terrestre está contaminando y destruyendo el medio ambiente y el segundo motivo es que no se puede extraer petróleo indefinidamente.

Tampoco se puede confiar en la energía nuclear ya que genera residuos radioactivos y aunque estén bien almacenados no dejan de suponer un peligro, además del peligro latente de que las centrales colapsen, contaminen y emitan radiación directamente sobre la biosfera.

Una alternativa puede ser la generación de energía hidroeléctrica, este tipo de energía se encuentra entre lo sostenible y lo insostenible, por un lado se trata de una energía que no genera residuos y que por tanto se puede considerar "limpia", también se trata de un sistema que genera energía en grandes cantidades, pero por otro lado la instalación de una central hidroeléctrica supone una destrucción total de la flora y fauna que pueda habitar en la zona de la instalación. Por ello es interesante seguir investigando en el área de la micro hidráulica, es un método de recuperación energética limpio y que además tiene un impacto mínimo en la naturaleza.

Este proyecto aborda este tema, el diseño y optimización de una instalación micro hidráulica con el fin de aprovechar al máximo un salto de agua obteniendo la mayor cantidad de energía posible.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La energía hidroeléctrica representa más del 92% de las energías renovables en todo el mundo. Por otro lado las plantas de micro hidráulica son solución más popular para proveer de energía a las zonas rurales. Esta tecnología puede proveer desde 5 hasta 100 kW, normalmente aprovechando el flujo de los ríos y llevándolo hacia una compuerta presurizada. Históricamente las instalaciones micro hidráulicas se han caracterizado por ser baratas en cuanto a su mantenimiento pero caras en cuanto a su construcción, esto está cambiando gracias a un mejorado equipamiento de turbinas, más pequeño, más ligero y más eficiente que en el pasado.





Hoy en día para este tipo de instalaciones se utilizan cada vez más las bombas comerciales trabajando como turbinas, se trata de una manera de reducir el coste del equipamiento ya que este tipo de bombas están estandarizadas y se venden a un precio relativamente bajo debido a que se producen en masa. Estas bombas están disponibles para una gran variedad de saltos y caudales, tienen una gran vida útil así como una gran cantidad de piezas de repuesto disponibles (Binama, Su, Li, Li, Wei y An, 2017). Por todo ello se trata de una alternativa más que ventajosa y económica, la única limitación puede ser que el rendimiento energético no sea tan elevado como el de una instalación específicamente diseñada para un caso particular.

### **3. MICRO HIDRÁULICA**

La micro hidráulica es un tipo de energía hidroeléctrica, se caracteriza por producir desde 5 hasta 100 kW, por debajo de 5kW se denomina pico hidráulica. Se trata de una alternativa energética limpia y económica, esto es debido a sus reducidos costes de instalación y a que su impacto medioambiental es reducido.

A nivel global la micro hidráulica representa un 7% de la generación mundial de energías renovables (UNIDO, 2016), siendo China su máximo exponente.

Aunque la energía hidroeléctrica convencional no es contaminante en sí misma, requiere una destrucción considerable del entorno, por otro lado, la micro hidráulica puede ser un gran avance para un futuro sostenible, ya que permite la electrificación de áreas rurales mientras que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Además debido a su bajo coste y su fácil montaje puede ser una gran herramienta para países en vías de desarrollo con difícil acceso a la red eléctrica.

Una de las principales ventajas que aporta este método de recuperación energética es la rentabilidad, ya que el coste de instalación y mantenimiento es muy reducido en comparación con otras energías renovables, otra ventaja es la versatilidad, puesto que la energía generada puede usarse tanto para cargar baterías como para introducirla en la red eléctrica, y por último es una energía sostenible ya que genera un impacto mínimo en el entorno.

Como desventajas se encuentra la limitación de expansión, tanto por potencia, tamaño así como por la distancia de conexión con la red eléctrica. Otra limitación es que las condiciones para que se pueda instalar este tipo de tecnología son muy específicas, por tanto no es posible instalar una micro turbina y generar energía en cualquier lugar (TECNOTURBINES, 2017).

Por tanto cabe concluir que se trata de un tipo de recuperación energética muy interesante sobre todo en el caso que ocupa a este proyecto por los motivos mencionados anteriormente, sostenibilidad, rentabilidad y gran capacidad de recuperación energética.



## 4. FUNDAMENTOS DE TURBOMÁQUINAS

### 4.1. Introducción

Para definir el concepto de turbomáquina es necesario empezar definiendo el concepto de máquina de fluido, se denomina máquina de fluido a cualquier máquina cuyo elemento transmisor o receptor de energía sea un fluido.

“Una turbomáquina es una máquina de fluido en la que el intercambio de energía se debe a la variación del momento cinético del fluido al pasar por los conductos de un elemento rotativo, dotado de álabes o paletas denominado rotor” (Mataix, Turbomáquinas hidráulicas, 1975).

Del mismo modo, se considera turbomáquina a cualquier máquina de fluido cuyo funcionamiento esté basado en la ecuación fundamental de las turbomáquinas o ecuación de Euler.

$$Y = \pm u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u} \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

*Ecuación 1 Ecuación de Euler*

Claudio Mataix propone tres criterios de clasificación de turbomáquinas:

- El principio de funcionamiento
- La compresibilidad del fluido
- El sentido de transmisión de la energía

Según el primer criterio las máquinas de fluido se pueden clasificar en turbomáquinas o máquinas de desplazamiento positivo. La diferencia principal de las máquinas de desplazamiento positivo respecto a las turbomáquinas es que la corriente de fluido no es continua.

Atendiendo a la compresibilidad del fluido, las turbomáquinas se pueden clasificar en turbomáquinas hidráulicas y turbomáquinas térmicas, tratándose de un fluido incompresible en las turbomáquinas hidráulicas y de un fluido compresible en las turbomáquinas térmicas. Es cierto que el fluido en las turbomáquinas hidráulicas varía su densidad y por tanto podría considerarse como compresible, pero esta variación es ínfima, por lo que la densidad puede considerarse constante a efectos de diseño, en las turbomáquinas térmicas esta variación es considerable.

Y por último, según el sentido de transmisión de la energía las turbomáquinas se clasifican en motoras o generadoras.

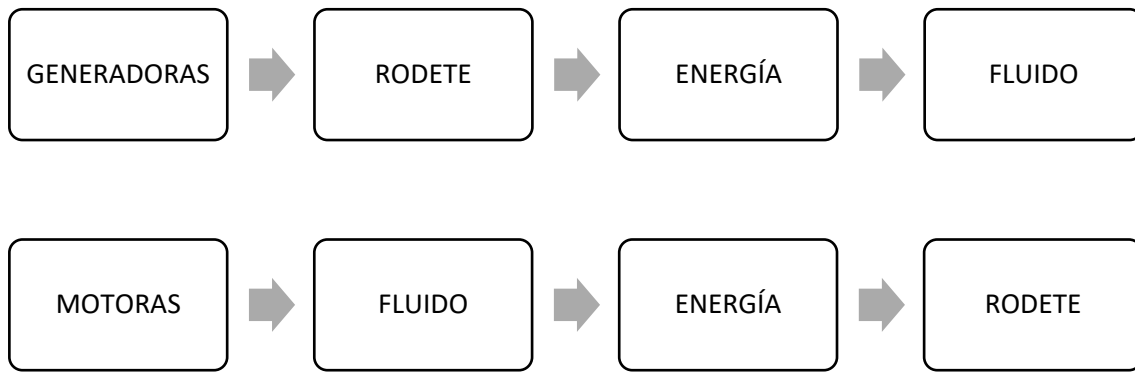


Figura 1 Esquema del sentido de transmisión de la energía en turbomáquinas generadoras y motoras

Para finalizar, se muestra una clasificación general de turbomáquinas según Claudio Mataix:

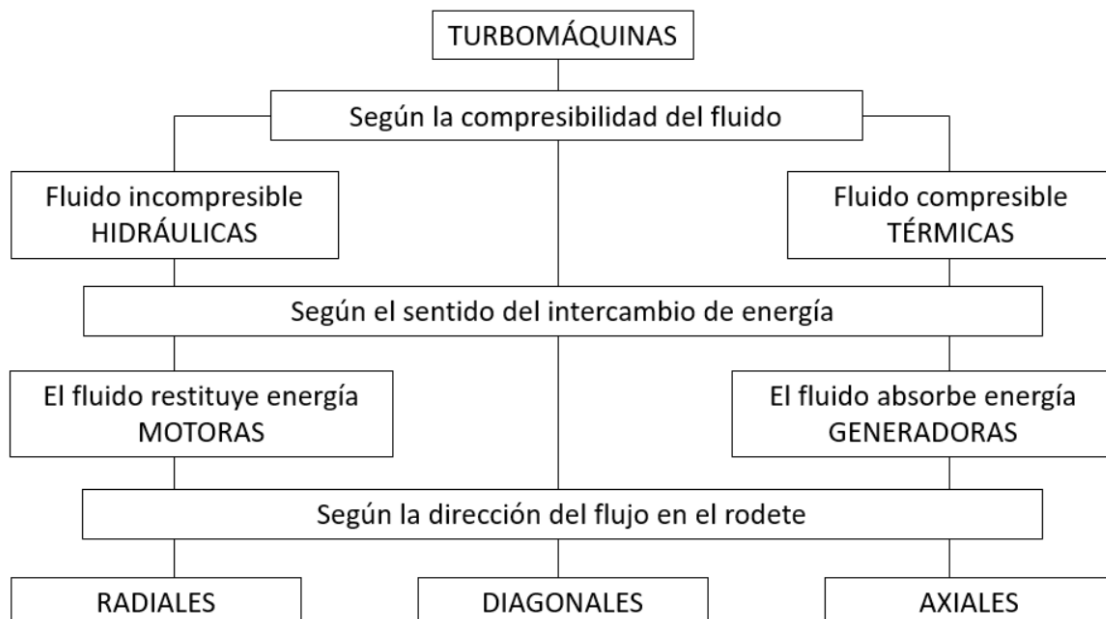


Figura 2 Clasificación de turbomáquinas

## 4.2. Fundamentos

### 4.2.1. Fluido newtoniano

Un fluido newtoniano se define como aquel cuya viscosidad se puede considerar constante. La relación entre el esfuerzo que recibe el fluido y su velocidad de deformación es lineal. Éste es el caso del agua la cual es el objeto de estudio pero también son newtonianos muchos otros fluidos como el aire, la gasolina, el aceite, etc.

### 4.2.2. Líneas de corriente

Se define línea de corriente como “una línea, en general no plana, tangente a los vectores velocidad del fluido en cada punto” (Mataix, 1975, p.83).

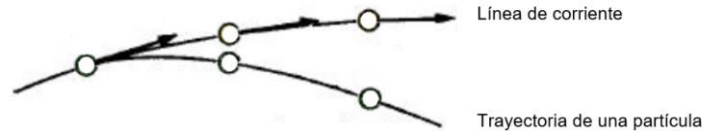


Figura 3 Esquema de una línea de corriente

Una vez definidas las líneas de corriente se define tubo de corriente como “un tubo material limitado por las paredes sólidas o imaginarias (del fluido mismo), formado por todas las líneas de corriente que pasan por los puntos de una curva cerrada” (Mataix, 1975, p.86). Y, “un hilo de corriente es un tubo de corriente de sección transversal infinitesimal” (Mataix, 1975, p.86).

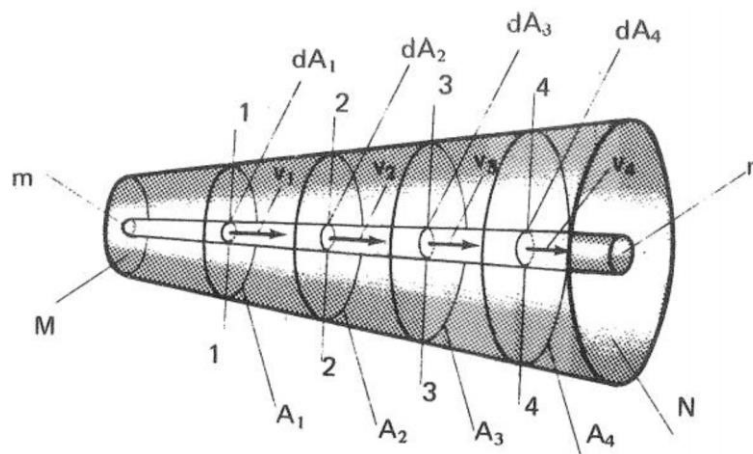


Figura 4 Hilo de corriente en un tubo de corriente

#### 4.2.3. Método de análisis unidimensional

Para tuberías de sección transversal pequeña se realiza un estudio unidimensional del flujo en el que se reduce el tubo de corriente a un hilo curvilíneo en el espacio, asignando los valores medios de la corriente a cada punto del hilo, concretamente la altura geodésica, la velocidad y la presión.

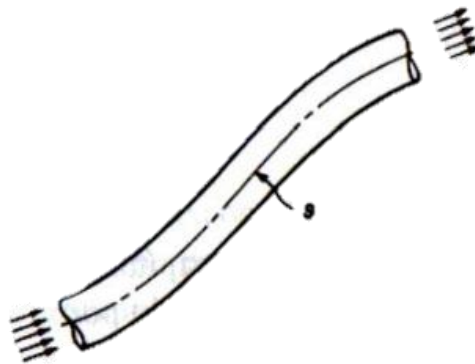


Figura 5 Esquema de un análisis unidimensional

Para este tipo de análisis son muy útiles herramientas como la ecuación generalizada de Bernoulli, la ecuación de Euler y el método de los triángulos de velocidad.

#### 4.2.4. Régimen laminar y turbulento

Un fluido en un conducto puede circular en régimen laminar o en régimen turbulento. Según el comportamiento de las partículas que componen el fluido el régimen será de un tipo o de otro. El tipo de régimen se mide numéricamente mediante el número de Reynolds.

-Régimen laminar: las partículas se mueven a lo largo de la tubería con de manera uniforme con una trayectoria definida, en láminas o capas. Un valor bajo del número de Reynolds se corresponde con el régimen laminar y la velocidad en este tipo de flujos suele ser baja en tubos de poco diámetro y con fluidos de elevada viscosidad.

-Régimen turbulento: las partículas en el interior del fluido de manera irregular, sin ningún tipo de orden. Cuanto mayor es la velocidad en la conducción más se tiende al desorden y por tanto a un régimen turbulento, correspondiéndose con valores elevados del número de Reynolds.

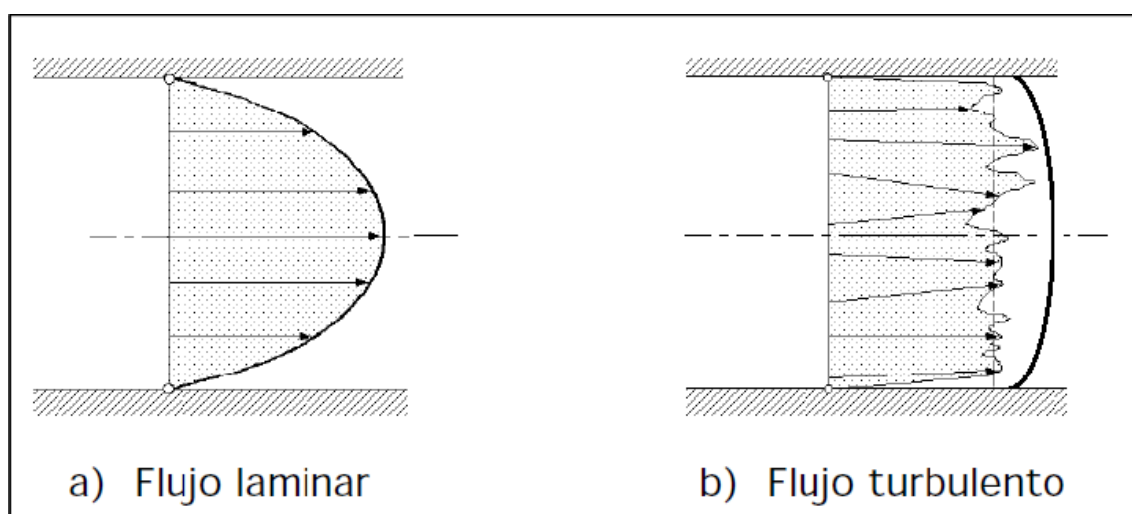


Figura 6 Descripción gráfica flujo laminar y turbulento

La expresión que permite hallar el número de Reynolds de un flujo es la siguiente:

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido

$v$  = Velocidad del fluido

$V$  = Viscosidad cinemática del fluido

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido

$D$  = Diámetro interno de la tubería

#### 4.2.5. Ecuación de Bernoulli

Se puede formular de la siguiente manera el primer principio de la termodinámica para un sistema dinámico abierto en régimen permanente, donde los términos representan energía por unidad de masa:

$$dQ = du + d(p v) + d\left(\frac{c^2}{2}\right) + d(z g)$$

*Ecuación 3 Primer principio de la termodinámica*

Donde:

$dQ$  = Calor (positivo si es adicionado al fluido; negativo si es cedido por el fluido)

$u$  = Energía interna

$v$  = Volumen específico

La ecuación de Bernoulli expresa el principio de conservación de la energía en un flujo. Esta ecuación permite identificar y cuantificar las tres componentes de energía que posee un flujo: cota geométrica (altura), velocidad del fluido y presión del fluido.

$$Z_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h$$

*Ecuación 4 Ecuación de Bernoulli*

Donde:

$Z$  = Cota geométrica

$P$  = Componente de presión

$V$  = Componente de velocidad

$h$  = Pérdidas de carga

$\gamma$  = Peso específico del agua

$g$  = aceleración de la gravedad

#### 4.2.6. Triángulos de velocidad

Si se analiza una partícula de fluido que entra en el rodete el cual gira a una velocidad  $\omega$ , su posición viene definida por el vector  $r_1$  y tendrá una determinada velocidad absoluta  $v_1$ , su salida vendrá definida por el vector posición  $r_2$  y tendrá una velocidad  $v_2$ . Estas velocidades tendrán una componente tangencial  $u_1$  y  $u_2$  debida a la rotación del rodete y una componente de velocidad relativa  $w_1$  y  $w_2$  que serán tangentes al punto en el que se encuentren en el álabe.

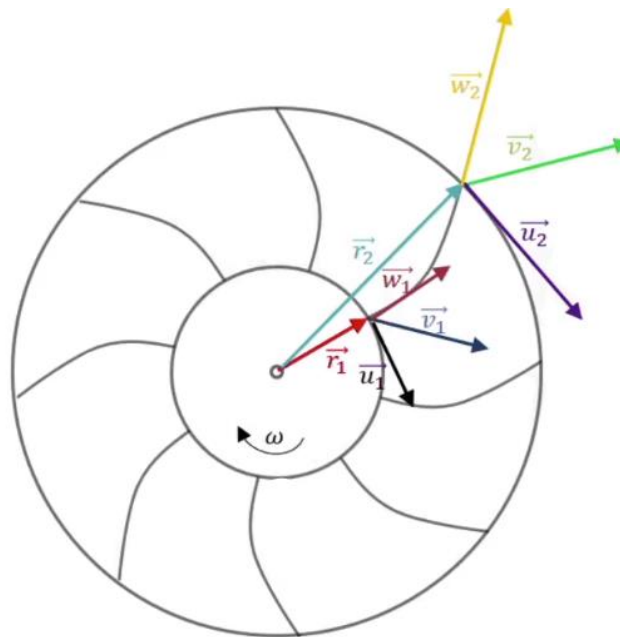


Figura 7 Velocidades a la entrada y salida del rodete

Mediante estos vectores se obtienen los triángulos de velocidad tanto a la entrada como a la salida del rodete:

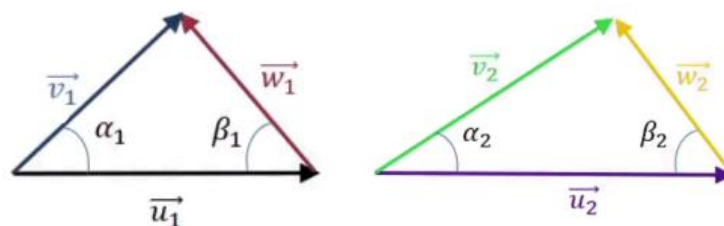


Figura 8 Triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del rodete

El ángulo formado por el vector  $u_1$  y  $w_1$  es  $\beta_1$  el cual corresponde con el ángulo de entrada del álabe, por otro lado, los vectores  $v_1$  y  $u_1$  forman el ángulo  $\alpha_1$ . Del mismo modo se obtienen los ángulos  $\beta_2$  y  $\alpha_2$  para el triángulo de velocidades a la salida.

Por último, el vector velocidad absoluta  $v$  según su ángulo  $\alpha$  podrá descomponerse en la velocidad periférica  $v_u$ , la cual es paralela a la dirección de la velocidad lineal de arrastre  $u$  y en la velocidad meridional  $v_m$ , la cual es perpendicular a dicha dirección (Polimedia, 2017).

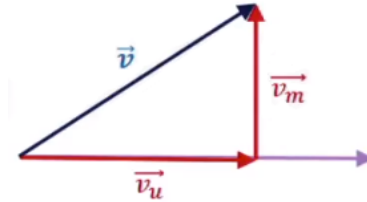


Figura 9 Descomposición del vector velocidad absoluta

#### 4.2.7. Ecuación de Euler

Como se ha explicado anteriormente el intercambio de energía en las turbomáquinas se produce en el rotor o rodete, a través de la interacción de las paredes del álabe con el fluido. Este intercambio energético se puede definir mediante la ecuación de Euler, esta ecuación constituye el principio básico de funcionamiento de las turbomáquinas hidráulicas.

Para analizar la ecuación de Euler se ha de partir de unas determinadas hipótesis:

- 1) Régimen permanente: se dice que un fluido se encuentra bajo un régimen permanente cuando sus propiedades en un determinado punto, tales como masa, peso específico, presión, velocidad, viscosidad, etc., no sufren variaciones a través del tiempo.
- 2) Flujo ideal: la viscosidad es despreciable.
- 3) Flujo irrotacional: no presenta torbellinos, es decir, no hay momento angular en el fluido respecto de cualquier punto.
- 4) Flujo unidimensional: todos los vectores de velocidad son paralelos y de igual magnitud.
- 5) El rodete tiene un número infinito de álabes.

La ecuación de Euler se presenta en dos formas, en la primera forma la ecuación determina la altura aportada o detrada del fluido en función de las componentes de velocidad tanto a la entrada como a la salida del rodete:

$$H_{t,\infty} = \frac{u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}}{g}$$

Ecuación 5 Ecuación de Euler

Donde:

$u_1$  = velocidad lineal de arrastre a la entrada

$u_2$  = velocidad lineal de arrastre a la salida





$v_{1u}$  = velocidad periférica a la entrada

$v_{2u}$  = velocidad periférica a la salida

$g$  = aceleración de la gravedad

En su segunda forma establece la misma altura aportada o detrída del fluido en función de la relación de los cuadrados de las diferentes componentes de los triángulos de velocidad:

$$H_{t,\infty} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

*Ecuación 6 Ecuación de Euler 2ª forma*

Donde:

$u_1$  = velocidad lineal de arrastre a la entrada

$u_2$  = velocidad lineal de arrastre a la salida

$w_1$  = velocidad relativa a la entrada

$w_2$  = velocidad relativa a la salida

$v_1$  = velocidad absoluta a la entrada

$v_2$  = velocidad absoluta a la salida

$g$  = aceleración de la gravedad

Los dos primeros términos de la segunda forma de la ecuación de Euler corresponden con la altura de presión aportada o retraída al fluido por el rodete, mientras que el tercer término corresponde con la altura dinámica aportada del fluido al rodete si es una turbina o del rodete al fluido si es una bomba.

$$H_{t,\infty} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

ALTURA DE PRESIÓN      ALTURA DINÁMICA

En conclusión, la ecuación de Euler establece que el intercambio de energía entre el rodete y el fluido en una turbomáquina hidráulica, debido a la variación de cantidad de momento cinético, la ecuación establece la altura ideal, es decir, la altura máxima aportada o recuperada según la velocidad de rotación de la máquina ( $w$ ) y del diseño del rodete (radio interior, radio exterior, ángulo de entrada del álabe y ángulo de salida del álabe).

### 4.3. Definición de máquina hidráulica y clasificación

En primer lugar, se entiende como máquina el dispositivo transformador de energía, éste recibe un tipo de energía y lo restituye en otra forma de energía.

El término de máquina hidráulica hace referencia a aquellas máquinas que trabajan con fluido incompresible, estas máquinas se basan en el principio de que la densidad del fluido en su interior será constante, o que la variación de ésta será despreciable. Dentro de máquinas hidráulicas, se distinguen dos tipos, las que reciben energía del fluido y las que confieren energía al fluido, denominándose máquinas motoras y generadoras respectivamente.

Además de por el sentido del flujo de energía las máquinas hidráulicas se pueden clasificar como:

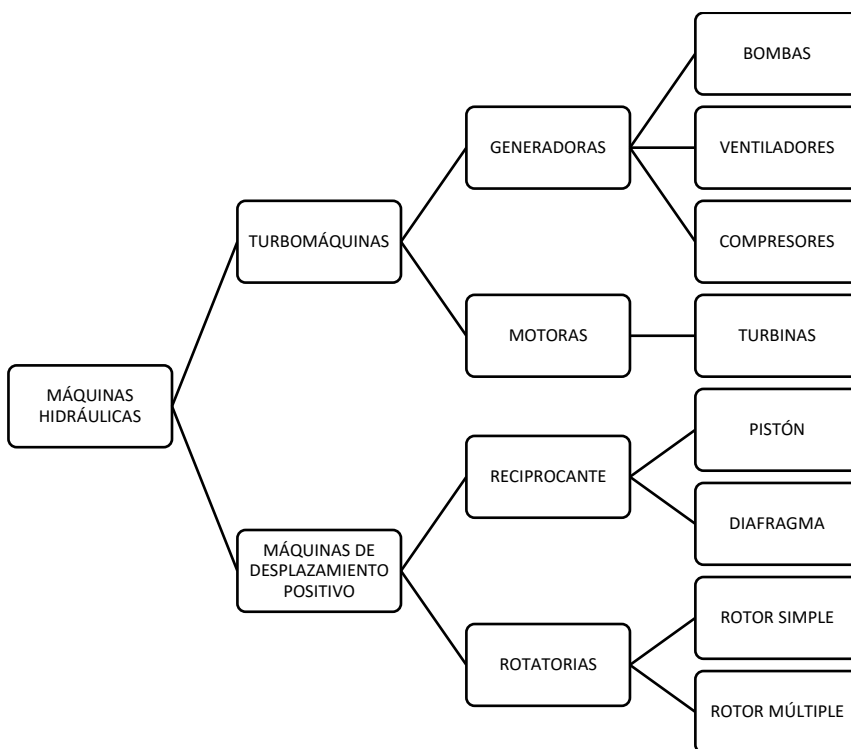


Figura 10: Clasificación máquinas hidráulicas

Por tanto, para el caso que ocupa este proyecto, las turbinas se clasifican dentro de la categoría de turbomáquinas motoras.



## 5. TURBINAS

### 5.1. Definición de turbina y clasificación

La turbina hidráulica es una turbomáquina motora, ésta absorbe energía del fluido y restituye energía mecánica. Consiste en un intercambio de energía entre el fluido y el entorno, la turbina cede energía en función de las necesidades de la instalación.

#### 5.1.1. Clasificación según grado de reacción ( $\varepsilon_T$ )

Existen diversas clasificaciones de turbinas, una de ellas es atendiendo al grado de reacción. El grado de reacción de una turbina ( $\varepsilon_T$ ), es la relación entre la altura de presión absorbida por el rodete y la altura total absorbida por el rodete:

$$\varepsilon_T = \frac{\text{altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}}$$

*Ecuación 7 Grado de reacción*

Por tanto, se tiene que, si una turbina no posee una componente de presión, su grado de reacción será igual a cero. Si el grado de reacción es nulo, se denominan turbinas de acción o de admisión parcial. Si por el contrario poseen cierta componente de presión y el grado de reacción es distinto de cero, las turbinas se consideran de reacción o de admisión total.

##### 5.1.1.1. Turbinas de acción

En las turbinas de acción, la presión del agua no varía en los álabes. El rodete no está inundado y por tanto, se encuentra a presión atmosférica. Dentro de las turbinas de acción se encuentran las Pelton, son las únicas que se fabrican en la actualidad.

##### 5.1.1.2. Turbinas de reacción

Por otro lado, en las turbinas de reacción, la presión a la entrada del rodete es superior a la atmosférica y a la salida inferior. El rodete está completamente inundado. En esta clasificación se hallan las Francis, Dériaz, turbinas hélice y Kaplan.

#### 5.1.2. Clasificación según la dirección del flujo

Las turbinas también se pueden clasificar según la posición relativa entre la dirección del flujo y el eje de la máquina. De este modo se encuentran las siguientes.

##### 5.1.2.1. Turbinas tangenciales

En este tipo de turbinas el fluido choca con el rodete de manera tangencial. Se hallan las turbinas Pelton dentro de este apartado.

##### 5.1.2.2. Turbinas axiales

Se clasifican dentro del flujo axial, ya que éste es paralelo al eje de la turbina. En esta clasificación se encuentran las turbinas hélice y las Kaplan.

### 5.1.2.3. Turbinas semiaxiales

También conocidas como turbinas como turbinas de flujo meridional o diagonal. El flujo tiene una componente no paralela al eje de la máquina. En este apartado se hallan las turbinas Francis y Dériaz.

### 5.1.3. Gráfico altura-caudal

En esta imagen se pueden observar los distintos tipos de turbinas sus rangos de caudal-altura y la potencia que son capaces de generar.

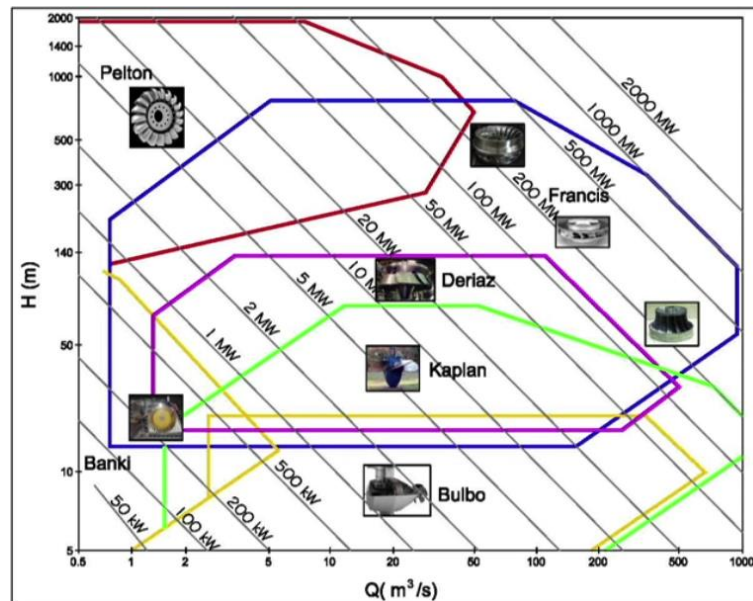


Figura 11 Rangos caudal-altura según tipo de turbina

## 6. TURBINAS DE HÉLICE

### 6.1. Introducción

Las turbinas de hélice o Propeller, se engloban dentro de la categoría de turbinas de reacción axiales, estas turbinas son adecuadas para trabajar con pequeños saltos y grandes caudales, pueden tener un rendimiento de hasta el 95%, por ello son las más adecuadas para el presente objeto de estudio. Cabe destacar que a diferencia de las turbinas Kaplan, las Propeller poseen álabes fijos.



Figura 12 Turbina de hélice

Se trata de turbinas rápidas ya que se diseñan a partir de un número específico de revoluciones ( $n_s$ ) superior 400 rpm, pudiendo llegar a valores por encima de 1000 rpm.

El rodete posee pocas palas y puede llegar a tener un diámetro de hasta el 40% del diámetro del tubo de aspiración.

## 7. ESTACIONES DEPURADORAS

### 7.1. Introducción

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), también denominadas planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) o planta de depuración son las estaciones sobre las que versará este proyecto.

Estas estaciones tienen como objetivo conseguir un agua efluente de una calidad determinada a partir de agua residual local.

### 7.2. Consumo energético

Según el estudio de TECNOAQUA "Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas de la Comunidad Valenciana", el consumo energético promedio es de 0.42 kWh/m<sup>3</sup>.

El Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) de España publica, en un estudio sobre el consumo energético de depuradoras de aguas residuales urbanas, que el consumo energético medio es de 0,67 kWh/m<sup>3</sup>. En este mismo estudio, IDAE publica la siguiente figura, en la cual se muestra el consumo energético medio de cada tratamiento en función de la capacidad de habitantes equivalente de la depuradora:

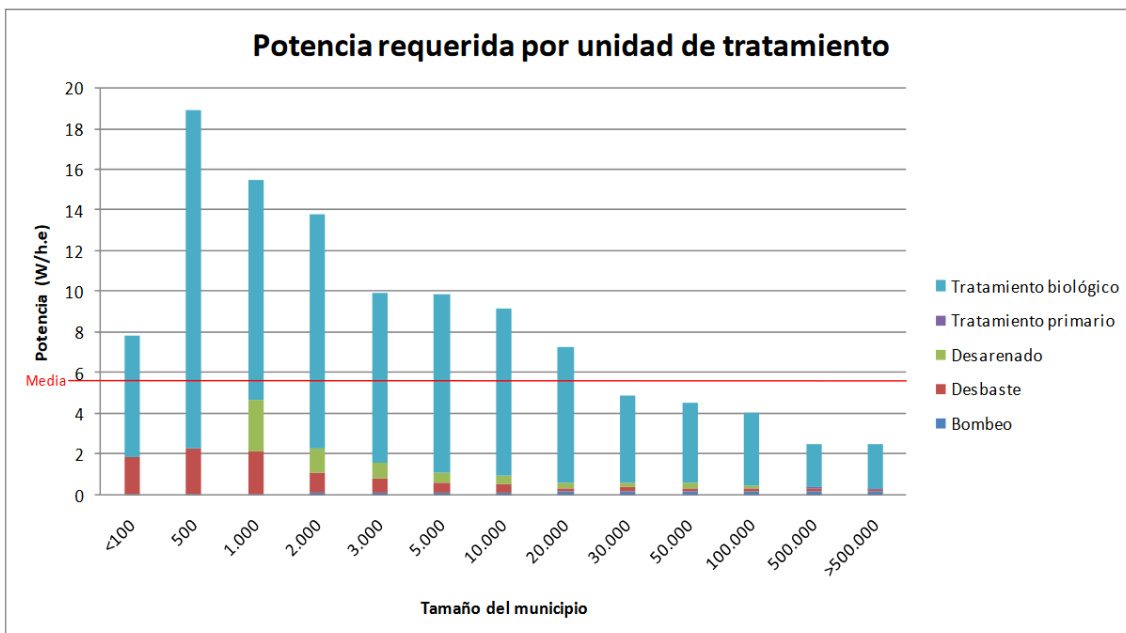


Figura 13 Potencia requerida por unidad de tratamiento

A nivel internacional el consumo de energía (según ENERWATER, 2015) es el siguiente:

Table 6 – Total energy consumption respect to country

kWh/m <sup>3</sup>	Canada	China	France	Germany	Italy	Japan	Spain	Sweden	UK	USA
Minimum	0.13	0.19	0.22	0.05	0.13	0.32	0.13	0.29	0.19	0.19
First quartile	0.32	0.21	0.53	0.23	0.33	0.37	0.55	0.30	0.21	0.21
Median	0.46	0.24	0.75	0.36	0.56	0.44	0.80	0.31	0.24	0.24
Third quartile	0.70	0.26	1.09	0.55	0.96	0.50	1.41	0.31	0.26	0.26
Maximum	2.40	0.29	1.28	3.14	1.67	0.54	5.50	0.32	0.29	0.29

Figura 14 Consumo de energía a nivel internacional

### 7.3. Volúmenes tratados

Según datos de la EPSAR (Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana), durante 2016 han estado en servicio 482 instalaciones de saneamiento y depuración, que han tratado un volumen de agua de 421,13 hm<sup>3</sup>.

A continuación se muestra el caudal distribuido por provincias y habitantes equivalentes tratados. También se muestra la depuración en servicio y la cantidad de instalaciones de saneamiento.

PROVINCIA	Instalaciones en servicio	Caudal tratado (hm <sup>3</sup> /año)	he tratados
ALICANTE	171	122,71	2.439.795
CASTELLÓN	117	52,29	569.893
VALENCIA	194	246,13	2.926.495
<b>TOTAL</b>	<b>482</b>	<b>421,13</b>	<b>5.936.183</b>

Figura 15 Volúmenes de aguas residuales tratadas en la Comunidad Valenciana

En el siguiente gráfico, se muestra la evolución del volumen de agua depurada:

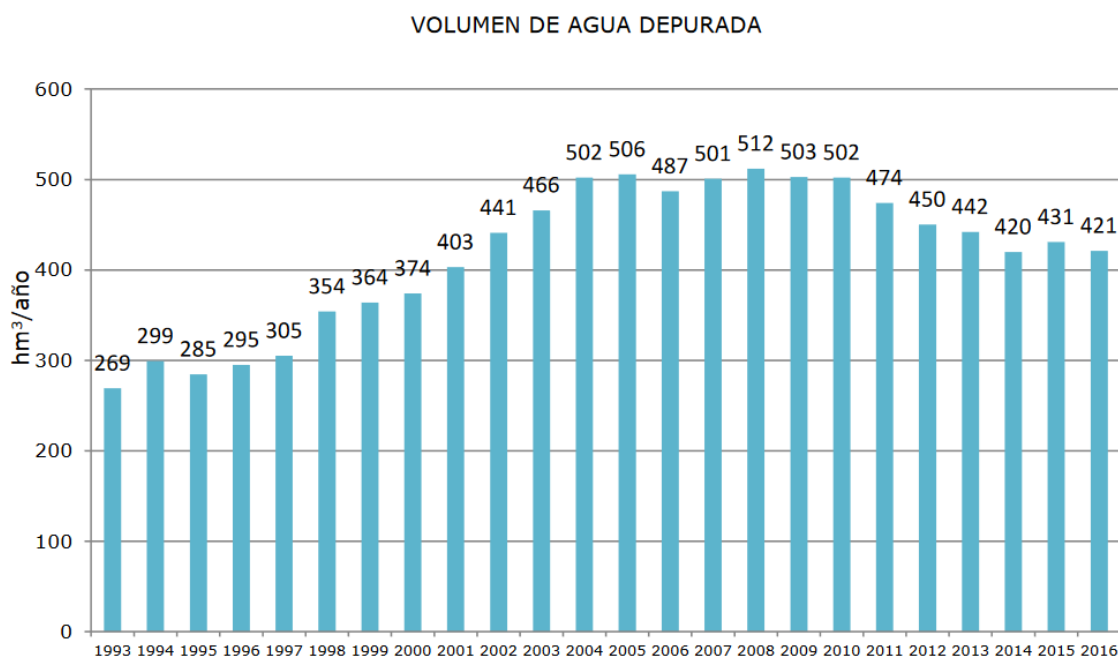


Figura 16 Volumen de agua tratada en España por año

A nivel nacional, España cuenta con más de 1.300 Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) que suministran un total de 4.231 hm<sup>3</sup> a las redes de distribución. Según AEAS “hay un total de 11.794 depósitos de distribución que suman un total de 31,79 hm<sup>3</sup>. La dotación de agua (el agua total que sale de los depósitos de distribución para el consumo (es de 248 litros por habitante y día, para todos los usos, cifra que ha ido descendiendo progresivamente desde el año 2007” (AEAS, 2016).

## 8. IMPORTANCIA DEL CFD

La mecánica de fluidos computacional o CFD (*Computational Fluid Dynamics*), consiste en el análisis del flujo de los fluidos, transferencias de calor y fenómenos asociados como las reacciones químicas.

Este método de análisis destaca por su rapidez y su precisión, también se reducen de manera considerable los costes y las dificultades que supone realizar una simulación experimental.

La precisión que obtiene es casi infinita permitiendo simular cualquier tipo de condición por compleja que sea.

La técnica es muy potente y abarca una amplia gama de usos tanto en áreas industriales como en áreas no industriales. Las aplicaciones más destacadas son:

- En la industria aeronáutica: la simulación computacional juega un papel fundamental en el diseño de aeronaves modernas y eficientes. El estudio de las fuerzas de sustentación y arrastre producidas por las alas puede realizarse convenientemente mediante un ordenador.

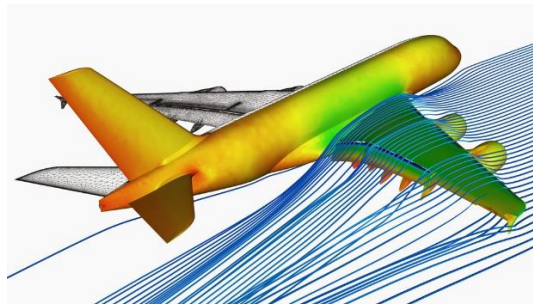


Figura 17 Ejemplo de CFD en industria aeronáutica

- Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado: el CFD permite la climatización de cabinas de automóviles, trenes, aviones, interiores de edificios entre otros.

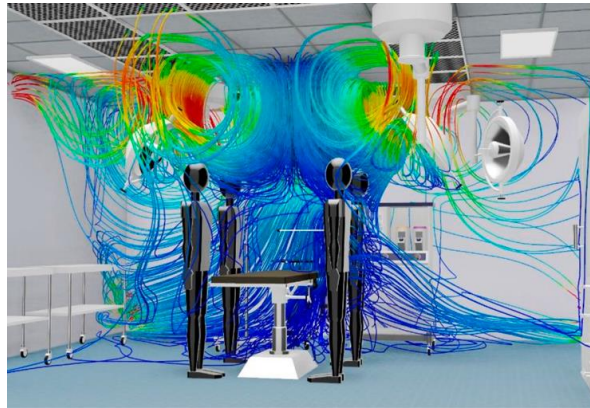


Figura 18 Ejemplo de CFD ventilación

- En la industria hidroeléctrica: el análisis CFD detecta las zonas sensibles propensas a la cavitación o estrés, que pueden ser eliminados a través de la optimización del diseño, ofrece resultados de las innumerables simulaciones de fluidos, dando un diagnóstico detallado del flujo en el interior de la turbina por donde el agua circula, permitiendo detectar los puntos clave para optimizar la eficiencia. Utilizando CFD se pueden cuantificar los beneficios económicos de la modernización y / o actualización de los componentes de la turbina, con el fin de planificar la inversión y determinar su viabilidad financiera.

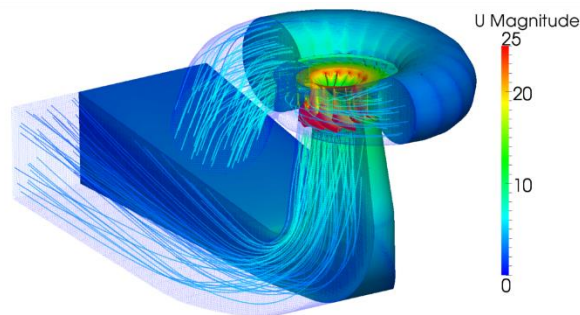


Figura 19 Ejemplo de CFD en la industria hidroeléctrica



## 9. FUNDAMENTOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES

### 9.1. Tensión

La tensión es la magnitud física que representa la fuerza por unidad de área en un punto sobre una superficie.

La tensión es una magnitud vectorial, es decir, queda definida mediante tres parámetros: módulo, dirección y sentido. Sus unidades en el Sistema Internacional son Pa ( $N/m^2$ ).

El vector tensión se puede descomponer en dos direcciones, una contenida en el plano y otra normal al mismo, obteniéndose así dos componentes de tensión, la tensión tangencial  $t$  la tensión normal respectivamente.

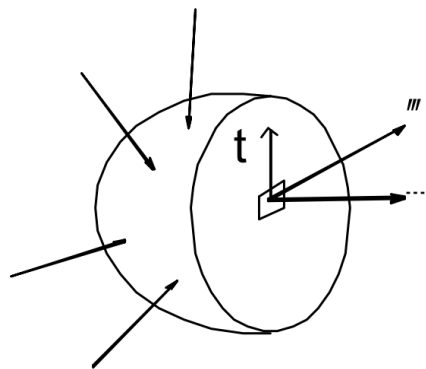


Figura 20 Tensión normal y tensión tangencial

### 9.2. Elasticidad y plasticidad

Se dice que un objeto o material es elástico cuando se le somete a una carga y es capaz de volver parcial o completamente a su forma inicial una vez que desaparece ésta. La plasticidad es una propiedad opuesta, un material es plástico cuando al dejar de actuar la carga que lo deforma mantiene su configuración deformada. Se define como límite elástico el valor mínimo de esfuerzo para producir una deformación plástica.

### 9.3. Ley de Hooke y módulo de Young

#### 9.3.1. Ley de Hooke

La Ley de Hooke es la base de la Resistencia de Materiales y se cumple siempre dentro de un régimen lineal elástico. Esta ley determina que en materiales elásticos, las deformaciones que experimenta dicho material son proporcionales a las fuerzas aplicadas.

$$F = -kx$$

Ecuación 8 Ley de Hooke

Siendo  $F$  el valor de fuerza,  $x$  la longitud de la deformación y  $k$  la constante de proporcionalidad que varía según el tipo de material

### 9.3.2. Módulo de Young

El módulo de elasticidad o módulo de Young es un valor que mide la resistencia de un material a ser deformado elásticamente. Cuanto más rígido sea un material, mayor será su módulo de Young.

El módulo de Young se denota con el símbolo E y se define como:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

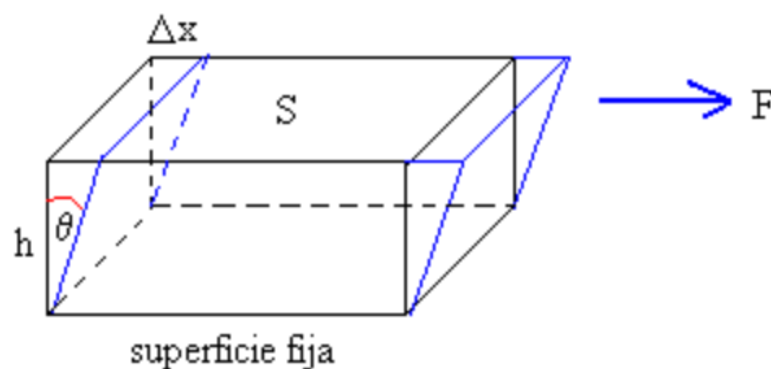
*Ecuación 9 Módulo de Young*

Donde  $\sigma$  es el valor del esfuerzo, y  $\epsilon$  es la deformación unitaria del material, es decir, la deformación sufrida entre la deformación total.

### 9.4. Modulo de cizalladura

El módulo de elasticidad transversal o módulo de cizalladura, es una constante elástica característica de cada material. Esta constante define el cambio de forma que sufre un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.

Este esfuerzo cortante se produce cuando una fuerza F actúa sobre un cuerpo de forma paralela a una de las caras, mientras que la otra cara permanece fija. En este tipo de deformaciones ocurre un cambio de forma pero no de volumen.



*Figura 21 Diagrama de un esfuerzo cortante*

Se define el esfuerzo cortante como :

$$\tau = \frac{F}{S}$$

*Ecuación 10 Esfuerzo cortante*

F es la fuerza tangencial al área S del lado en el que se aplica. Si se trabaja en sistema internacional las unidades resultan  $N/m^2$ .

Por otro lado, la deformación debida al esfuerzo cortante se define como:

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{\Delta_x}{h}$$

*Ecuación 11 Deformación debida a un esfuerzo cortante*

Donde  $\theta$  es la deformación angular,  $\Delta_x$  es la distancia horizontal que se desplaza la cara sobre la que se aplica la fuerza, y  $h$  corresponde con la altura del objeto (Franco, 2010).

Por último el módulo de cizalladura se define mediante la expresión:

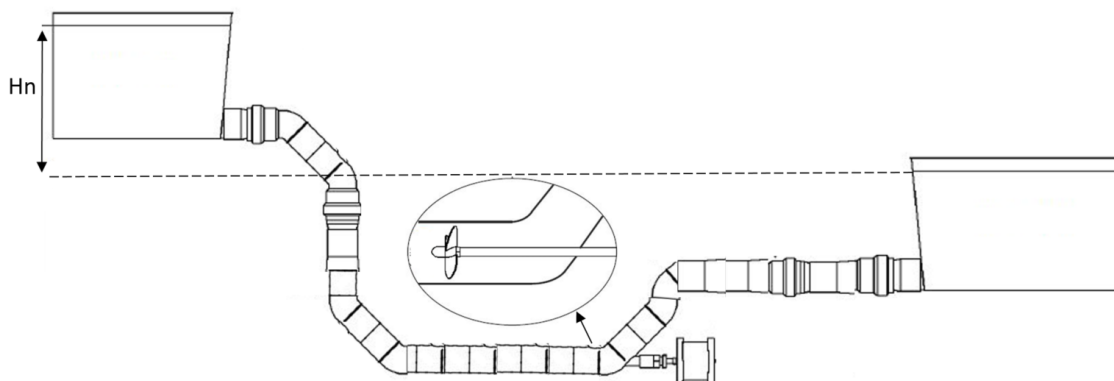
$$G = \frac{F/S}{\Delta_x/h} = \frac{F/S}{\theta}$$

*Ecuación 12 Módulo de cizalladura*

## 10. CONDICIONES DE LA INSTALACIÓN

### 10.1. Situación inicial

Se tiene una instalación en la que existen dos depósitos con un salto de agua de entre 3 y 10 metros. Los depósitos están unidos por una tubería. Se desea introducir una turbina de hélice conectada a un generador con el fin de aprovechar el salto de agua y obtener energía eléctrica.



*Figura 22 Diagrama de la instalación*

La instalación deberá tener los siguientes elementos principales:

- Conducción
- Bulbo con hélice
- Eje principal
- Generador

## 11. METODOLOGÍA

A continuación se muestra un diagrama de flujo en el que se pueden visualizar las etapas del proyecto y la manera de proceder del mismo.

En la primera etapa se calculan los principios básicos de la instalación como velocidades de giro, potencias, rendimientos, etc.

Posteriormente se procede al cálculo de las dimensiones principales de la turbina, estas dimensiones se obtienen a través de diferentes métodos estadísticos. Una vez obtenidas las dimensiones principales se dibuja la turbina en un entorno CAD.

A continuación se realizan simulaciones del flujo con el fin de hallar parámetros más concretos de la instalación como caudales, presiones, energía absorbida, tensiones, etc.

Y por último con los datos obtenidos previamente se realiza un estudio en el que se selecciona tanto el material como el proceso de fabricación.

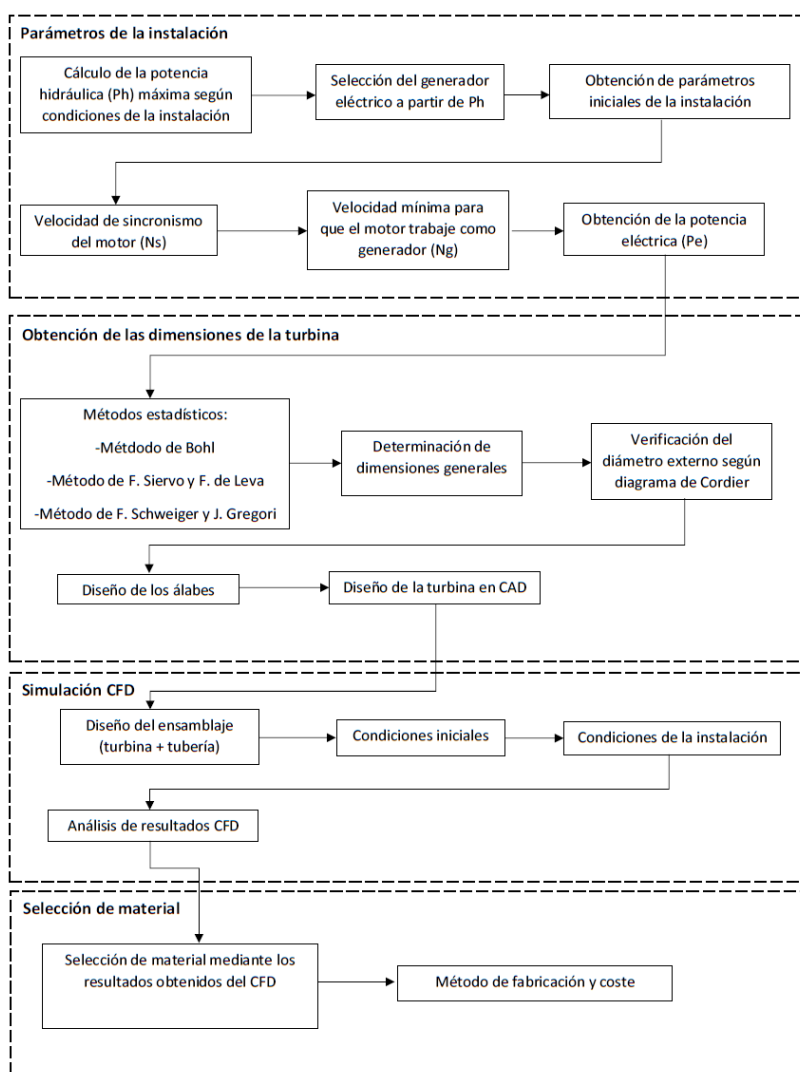


Figura 23 Diagrama de flujo de las diferentes etapas del proyecto

## 12. PARÁMETROS DE LA INSTALACIÓN

### 12.1. Potencia hidráulica máxima

Para empezar con el predimensionamiento del motor es necesario establecer de manera aproximada la potencia hidráulica máxima que será capaz de proporcionar la instalación. Para averiguarlo se procede al uso de la ecuación de potencia hidráulica y se aplican los valores máximos de la instalación para cada parámetro. Dicha ecuación es la siguiente:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H_n$$

*Ecuación 13 Potencia hidráulica*

Donde:

- P: Potencia hidráulica, W.
- $\gamma$ : Peso específico del agua, N/m<sup>3</sup>.
- Q: Caudal, m<sup>3</sup>/s.
- H<sub>n</sub>: Altura neta, m.

Se toma el valor máximo de H<sub>n</sub>, en este caso, 10 m. Con todo ello se obtiene un valor de potencia hidráulica máxima de 2647.58 W, es decir, aproximadamente 2.65 kW.

### 12.2. Selección de generador

El siguiente paso consiste en seleccionar un generador, en este caso en lugar de un generador se usará un motor eléctrico de inducción, también conocido como asíncrono. El uso de este tipo de motores se debe a su amplia oferta en el mercado pudiendo adaptarse a casi cualquier condición de trabajo y a un precio más económico ya que son muy comunes. El motor seleccionado nos dará una primera idea de ciertas condiciones de diseño como son el número de revoluciones, la potencia, entre otros.

El motor seleccionado es el "MA132S-6", se trata de un motor trifásico de 6 polos y con una potencia de 3 kW.

La selección de este motor está detallada en el anexo 1.

### 12.3. Parámetros de la instalación

Una vez seleccionado el generador, se procede a calcular los parámetros iniciales de la instalación.

#### 12.3.1. Velocidad de sincronismo de los motores

Mediante la fórmula de motores eléctricos se obtiene la velocidad de sincronismo de los motores:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

*Ecuación 14 Velocidad de sincronismo*

Donde:

$f$ : Frecuencia, Hz.

$p$ : Número de polos.

$$N_s = 1000 \text{ rpm}$$

- $f$ : 50 Hz
- $p$ : 6 polos
- $N_s$ : 1000 rpm

Por otro lado se obtiene la velocidad de los motores a plena carga del catálogo:

$$N_r = 960 \text{ rpm}$$

A continuación se obtiene el valor del deslizamiento del motor mediante la siguiente ecuación:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

*Ecuación 15 Valor de deslizamiento*

El deslizamiento resulta:

$$s = 0,04$$

### 12.3.2. Velocidad para que el motor trabaje como generador

Para que un motor asíncrono trabaje como generador debe girar a un mayor número de revoluciones que cuando funciona como motor. Ésta velocidad se obtiene con la siguiente expresión:

$$N_g = (1 + s) \cdot N_s$$

*Ecuación 16 Velocidad para que un motor asíncrono trabaje como generador*

Donde:

- $N_g$ : Velocidad a la que tiene que girar el motor para trabajar como generador, rpm.
- $s$ : Deslizamiento del motor eléctrico

Se obtiene el siguiente valor:

$$N_g = 998,4 \text{ rpm}$$



### 12.3.3. Potencia eléctrica

A partir de la ecuación de potencia eléctrica es posible obtener los valores de caudal y altura de la instalación. La potencia eléctrica es conocida ya que es la que proporciona el motor eléctrico, gracias a esto se pueden deducir los demás valores. La expresión es la siguiente:

$$Pe = \frac{\eta_{g*} \cdot \eta \cdot Q \cdot H \cdot \rho}{102}$$

*Ecuación 17 Potencia eléctrica*

Donde:

- $\eta_g$ : Rendimiento del generador.
- $\eta$ : Rendimiento total.
- $Q$ : Caudal, m<sup>3</sup>/s.
- $\rho$ : Densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>.
- $Pe$ : Potencia eléctrica, kW.

- $\eta_g$ : 0,7 %
- $\eta$ : 0,8 %
- $Q$ : 0,027 m<sup>3</sup>/s
- $\rho$ : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- $Pe$ : 3 kW

#### 12.3.3.1. Resumen de datos para el diseño del grupo generador

- Potencia eléctrica del generador,  $Pe$ : 3 kW
- Rendimiento del motor como generador ( $\eta_g$ ): 70 %
- Rendimiento de la turbina ( $\eta$ ): 80 %
- Velocidad de rotación del motor para que funcione como generador ( $N_g$ ): 998,4 rpm
- Número de polos: 6 polos
- Frecuencia: 50 Hz

Con la ecuación anterior de potencia eléctrica y los datos de la tabla anterior se pueden obtener la relación entre el caudal y la altura ya que todos los parámetros son conocidos menos estos dos. Se dan valores de altura entre 3 y 10 metros y se obtiene lo siguiente:

$$\frac{0.546}{H} = Q$$



Tabla 1 Datos para el diseño del grupo generador

H (mca)	Q (m3/s)
3	0,18214286
4	0,13660714
5	0,10928571
6	0,09107143
7	0,07806122
8	0,06830357
9	0,06071429
10	0,05464286

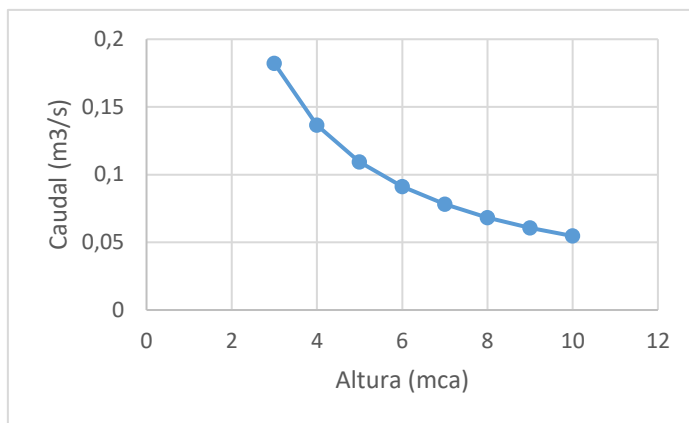


Figura 24 Curva caudal altura

Con los datos obtenidos se aplica la siguiente expresión:

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Ecuación 18 Velocidad específica o número de Brauer

Siendo N la velocidad de rotación de la turbina mediante la cual se obtiene el valor de velocidad específica o número de Brauer para cada caudal.

Tabla 2 Salto y velocidad específica de caudal o número de Brauer

H(m)	Nq (rpm)
3	186,926
4	130,466
5	98,709
6	78,593
7	64,818
8	54,854
9	47,344
10	41,502



El rango de velocidad específica para este tipo de turbinas es:  $N_q = (90 - 300)$  rpm. Por tanto se hará hincapié en los valores de altura entre 3 y 5 m ya que son los que se encuentran dentro del rango, resultando:

Tabla 3 Salto y velocidad específica de caudal o número de Brauer

H(m)	Nq (rpm)
3	186,926
3,2	172,438
3,4	159,854
3,6	148,831
3,8	139,105
4	130,466
4,2	122,747
4,4	115,812
4,6	109,553
4,8	103,877
5	98,709

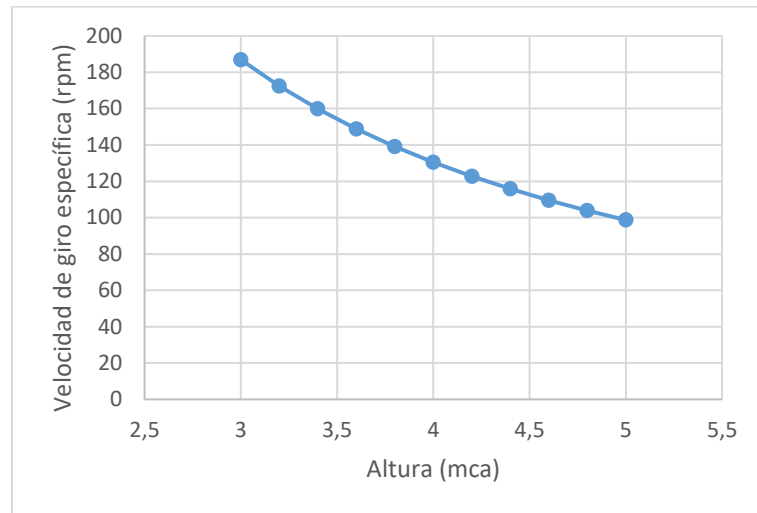


Figura 25 Curva velocidad específica y altura

## 13. OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA TURBINA

Una vez obtenidos los parámetros de la instalación se procede a obtener las dimensiones generales de la turbina mediante métodos estadísticos así como las dimensiones y ángulos de los álabes.

Este análisis se encuentra detallado en “ANEXO 2: ANÁLISIS HIDRÁULICO UNIDIMENSIONAL” y los resultados son los siguientes:

- Dimensiones generales:

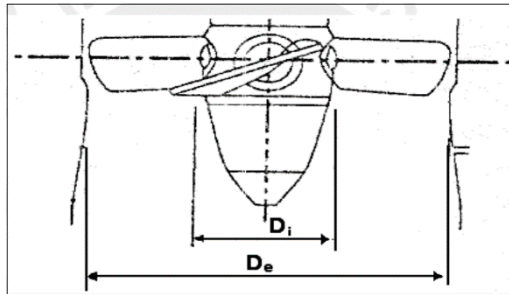


Figura 26 Dimensiones generales

Siendo:

- $D_e = 278 \text{ mm}$
- $D_i = 52 \text{ mm}$

- Dimensiones de los álabes:

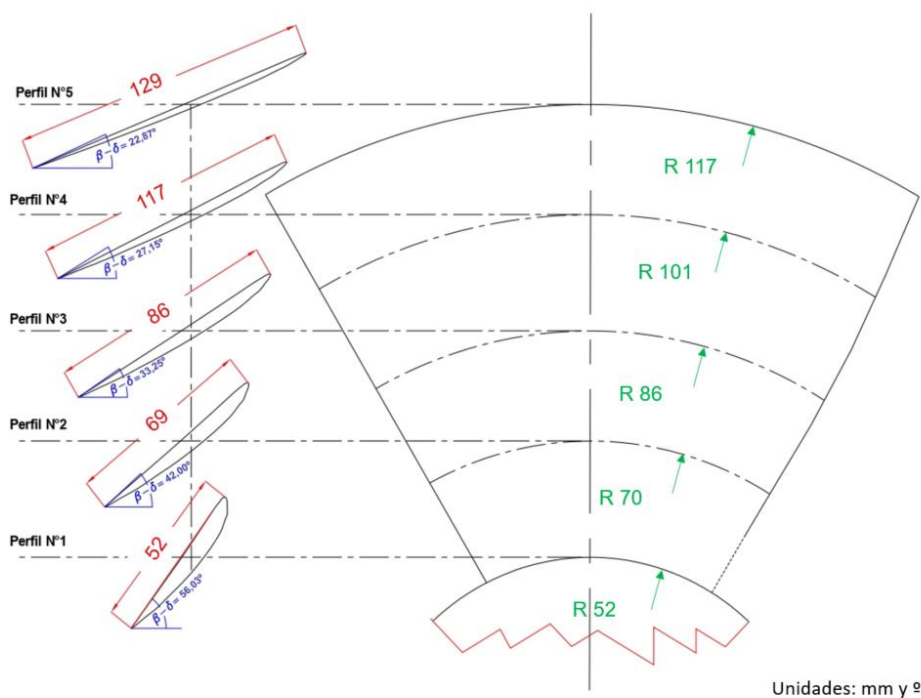


Figura 27 Resumen del diseño de los álabes

### 13.1. Diseño de la turbina en CAD

Con las dimensiones obtenidas a partir de los cálculos se dibuja la turbina en CAD, se añade un eje para que la posterior simulación en CFD sea más precisa.

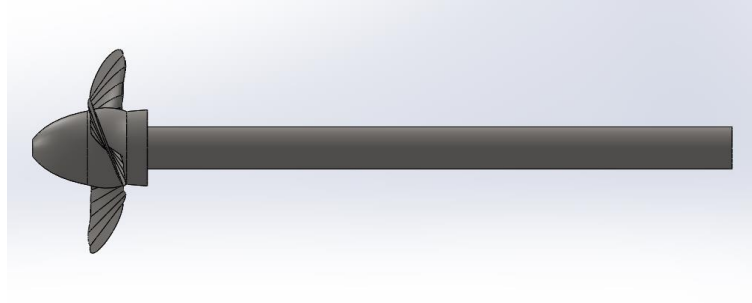


Figura 28 Vista lateral turbina

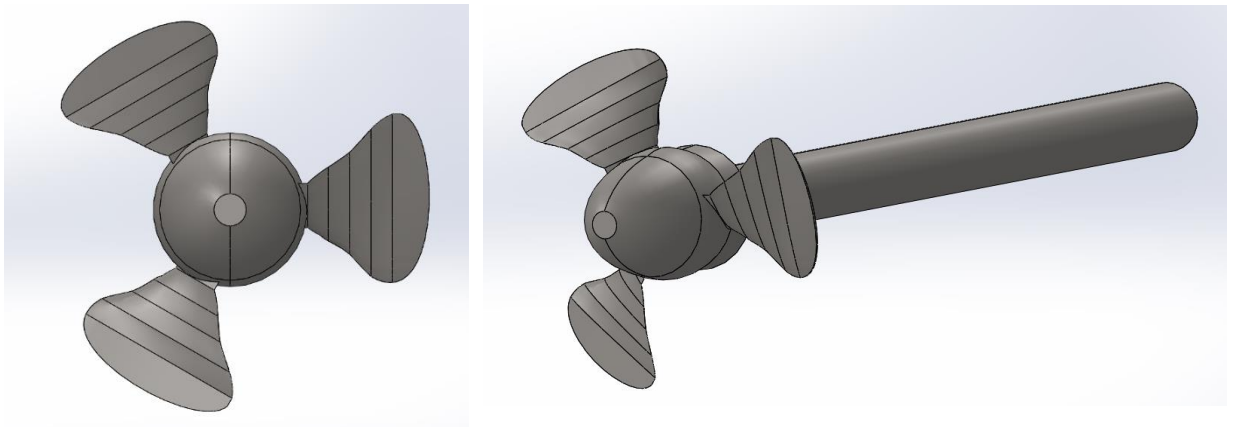


Figura 29 Vista frontal y en perspectiva turbina

## 14. SIMULACIÓN CFD

### 14.1. Ensamblaje

En primer lugar se crea una tubería donde se alojará la turbina. Posteriormente se crea un ensamblaje con las dos piezas y se ponen tapones en los extremos ya que son necesarios para que *Flow Simulation* pueda realizar la simulación ya que el conjunto de ser debe ser un recipiente cerrado.

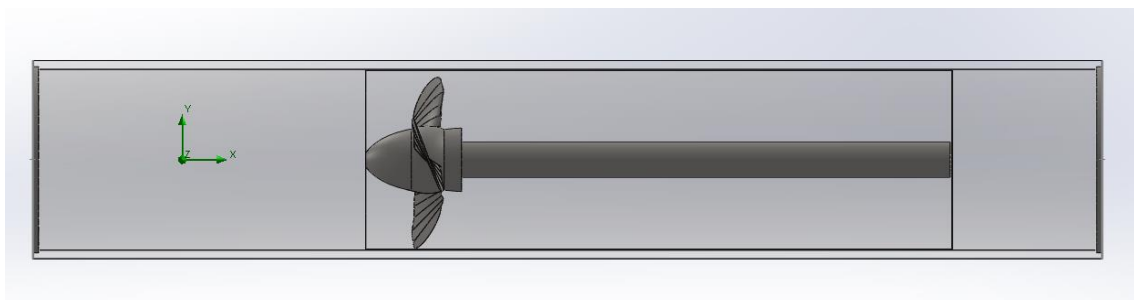
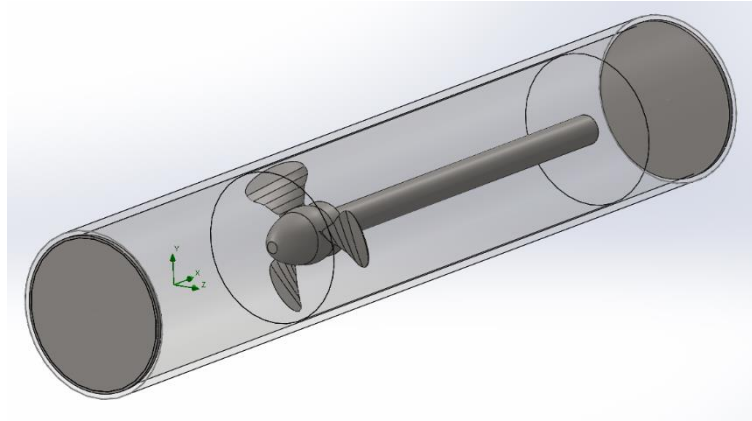


Figura 30 Vista lateral del ensamblaje



*Figura 31 Ensamblaje en perspectiva*

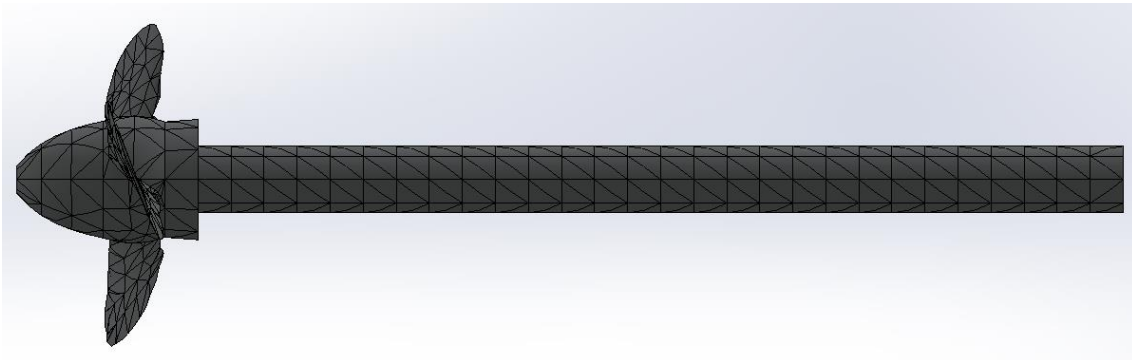
## **14.2. Configuración de datos iniciales**

- Definición de la geometría

En el caso de la turbina la geometría viene determinada por los cálculos, en el caso de la tubería las dimensiones se cogen de un catálogo de tuberías de acero.

- Generación de malla:

Se ha generado una única malla para todos los casos de estudio debido a que la geometría del ensamblaje no varía.



*Figura 32 Mallado de la turbina*

El tamaño de los elementos es de 29 mm y la tolerancia de 1.5 mm.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	29.1824 mm
Tolerancia	1.45912 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	3665
Número total de elementos	1938
Cociente de aspecto máximo	129.98
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	74.2
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	8.15
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:06
Nombre de computadora	

Figura 33 Detalles de la malla

- Configuración de la simulación:

Mediante la herramienta Wizzard se configuran los datos y condiciones iniciales de la simulación:

- Tipo de flujo:

A la hora de determinar el tipo de flujo existen dos posibilidades, flujo interno o externo. Se trata de un flujo interno cuando el fluido está encerrado, como por ejemplo el flujo del agua dentro de una tubería. Se habla de flujo externo cuando el fluido se desarrolla libremente sin restricciones impuestas por superficies adyacentes, como en el caso del aire fluyendo sobre un coche en marcha.

En este caso se tiene un fluido circulando por una tubería y por tanto se trata de un flujo interno. También se ha de marcar la casilla de rotación para indicar que habrá un elemento rotativo posteriormente.

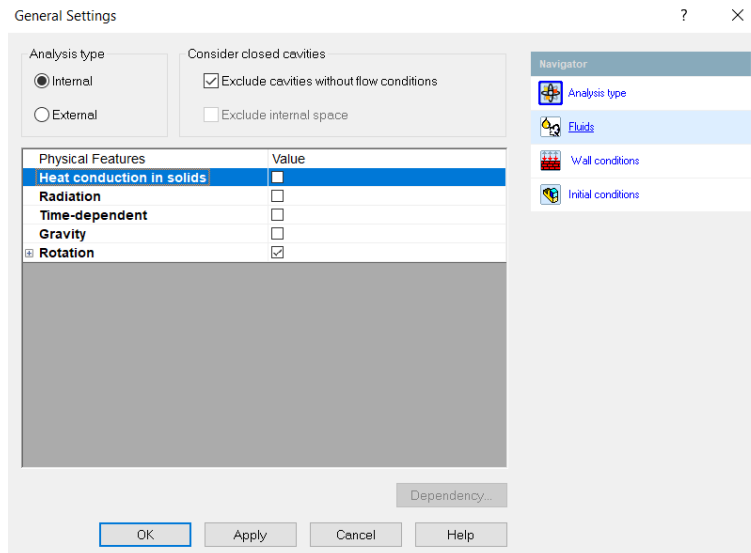


Figura 34 Flow Simulation, ajustes generales: Tipo de análisis

○ Tipo de fluido:

Se selecciona el agua como fluido y en cuanto al tipo de flujo se indica tanto laminar como turbulento ya que se desconoce esta característica a priori.

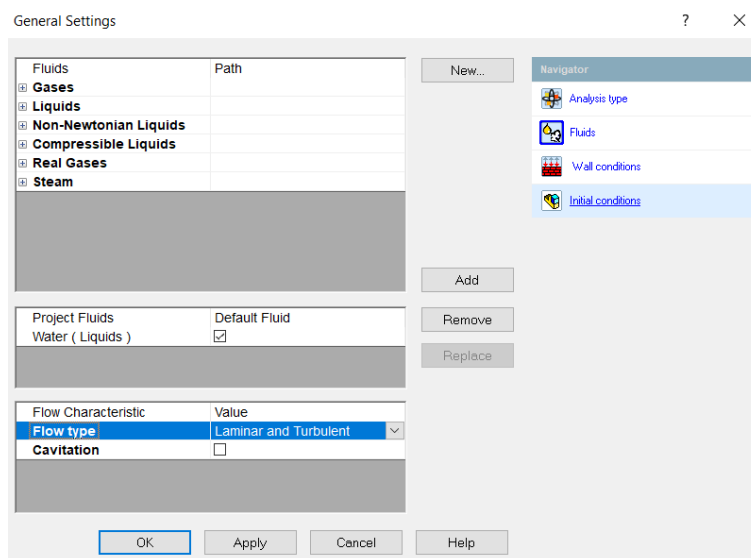


Figura 35 Flow Simulation, ajustes generales: Fluidos

○ Tipo de pared y rugosidad:

Las paredes de la tubería se considerarán adiabáticas, es decir, no existe intercambio de calor con el entorno. La rugosidad se considerará de 100 micras.

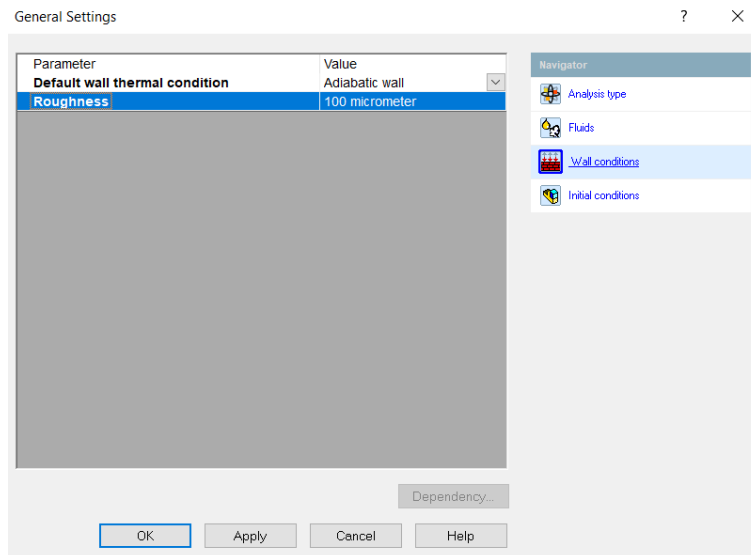


Figura 36 Flow Simulation, ajustes generales: Rugosidad

○ Condiciones iniciales:

Las condiciones iniciales permiten ayudar al proceso de simulación acercándolo a la solución, si se conoce aproximadamente cuáles serán los valores finales, en este caso se desconocen, por tanto se dejan por defecto.

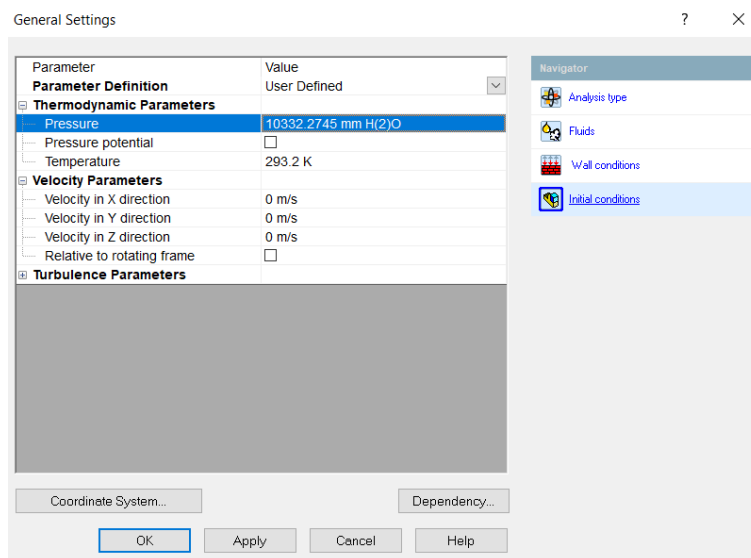


Figura 37 Flow Simulation, ajustes generales: Condiciones iniciales

### 14.3. Configuración de condiciones de la instalación:

- Dominio computacional:

El dominio computacional corresponde al volumen donde tendrá lugar el análisis, se ajuste de manera sencilla de manera que contenga a todo el fluido dentro de la tubería.

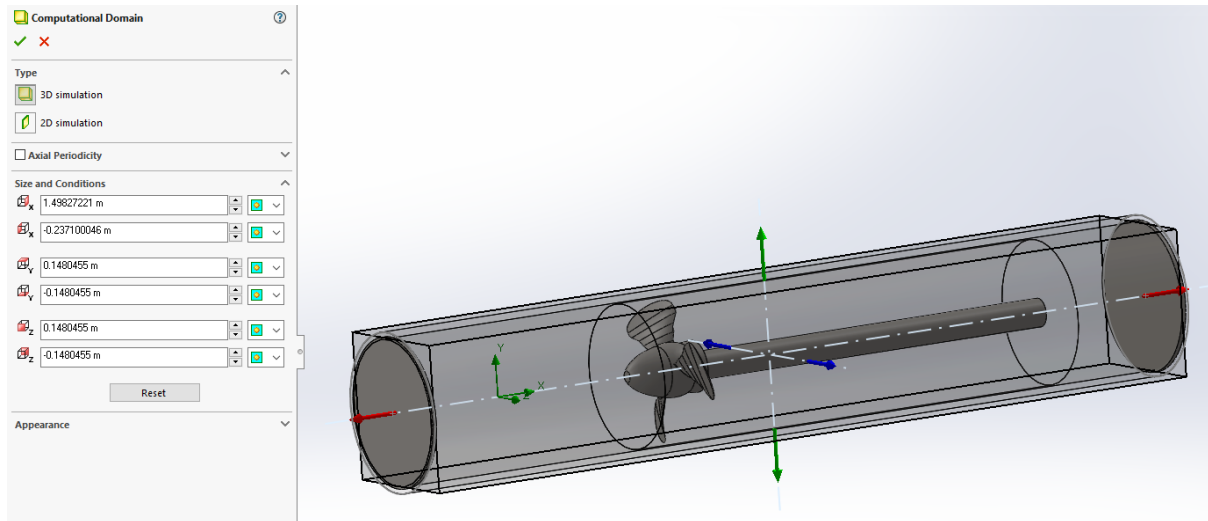


Figura 38 Dominio computacional

- Presión:

Existen tres tipos de presiones como condición de contorno en *SolidWorks*, presión ambiental, presión estática y presión total.

En este caso se selecciona la presión ambiental, y se sitúa a la salida de la tubería indicando el valor de presión correspondiente:

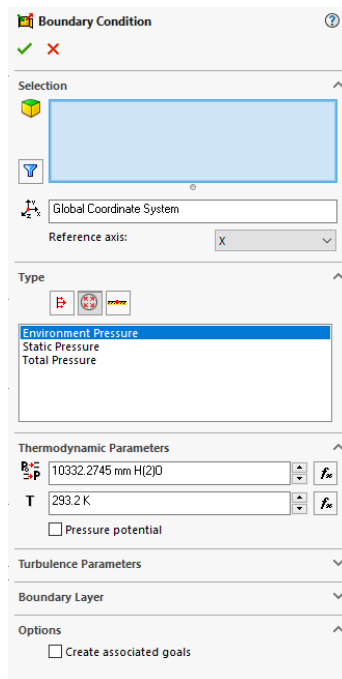


Figura 39 Condiciones de contorno



○ Región rotativa:

Se selecciona la turbina como región rotativa y se introduce el valor correspondiente de velocidad de giro como valor negativo, para que la turbina absorba energía en lugar de producirla.

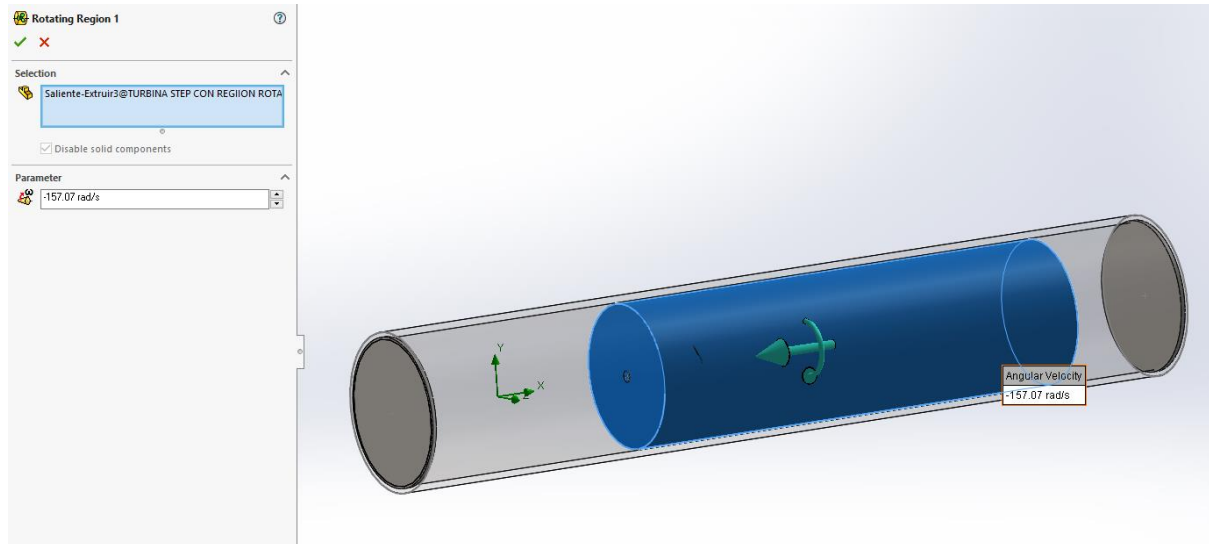


Figura 40 Región rotativa

- Resumen de la configuración:
  - Caudal: 2-7 l/s
  - Altura: 4 m
  - Diámetro exterior (De) turbina: 292 mm
  - Presión a la salida: 10.33 mca
  - Pared adiabática, rugosidad: 100  $\mu\text{m}$
  - Flujo interno
  - Velocidad de giro: 900-1500 rpm

#### 14.4. Resultados CFD

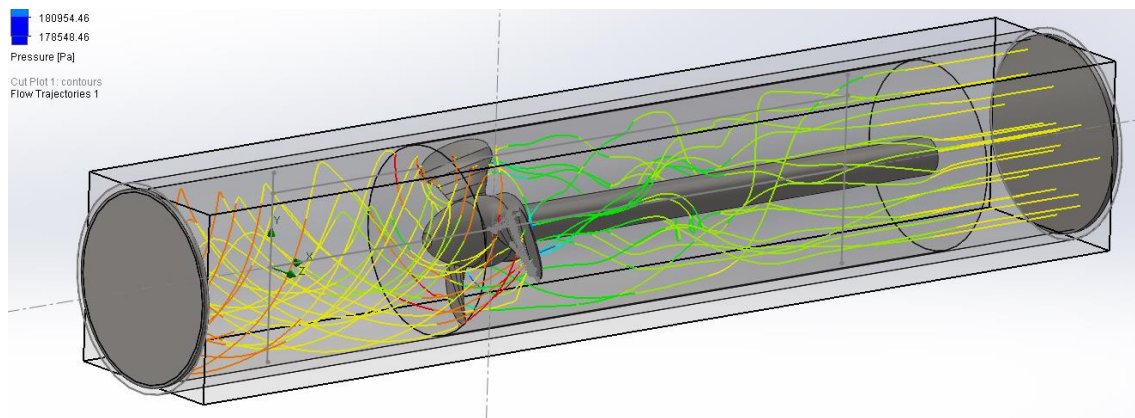


Figura 41 Trayectoria del fluido a lo largo de la conducción

Se obtienen los siguientes valores de tensión normal y tensión cortante, en el anexo 2 se explica con detalle cómo se han obtenido estos valores:



Tabla 4 Tensiones obtenidas en la simulación

Velocidad de giro (rpm)	Tensión normal máxima en el álabe (MPa)	Tensión Cortante máxima (MPa)
1500	2,45	1,05

## 15. SELECCIÓN DE MATERIAL

Una vez realizada la simulación de fluidos y con los resultados obtenidos se procede a obtener el material más adecuado para la fabricación de la turbina.

Los requisitos para la selección del material han sido los siguientes:

- No debe deformarse ante las presiones ejercidas en el interior de la tubería.
- Debe conservar sus propiedades mecánicas sin importar la temperatura del agua.
- Debe ser resistente al agua.
- No debe flotar.
- El material debe ser lo más económico posible.
- Se ha de fabricar una única unidad.
- La tolerancia admisible debe ser de 0.2 mm.
- La inversión en maquinaria debe ser lo más baja posible.

A continuación utilizando el software *CES EduPack 2018* se transforman estos requisitos de diseño en filtros para que el programa muestre los materiales que se ajustan a las necesidades establecidas, así como el método de fabricación más adecuado.

El proceso de filtrado de materiales llevado a cabo en *CES EduPack 2018* se encuentra detallado en el Anexo 4.

Tras el análisis el material seleccionado ha sido el acero inoxidable martensítico AISI 440B, al cual se le dará forma mediante el proceso de fundición a la cera perdida.

## 16. PRESUPUESTO

Para realizar una estimación del coste se tendrán en cuenta los elementos esenciales para el montaje de la turbina.

El coste total es de 7.456,36 €.

El presupuesto detallado se incluye en el anexo 7.



## 17. CONCLUSIONES

Se ha diseñado una turbina de hélice para recuperar energía de un salto de agua determinado con las siguientes premisas de partida:

- La turbina va instalada entre el depósito primario y el secundario de una depuradora, con salto de agua determinado.

- El diseño debe ser válido para instalaciones con características similares a las de diseño.

Partiendo de estas premisas, se ha obtenido la potencia hidráulica máxima que podrá proporcionar la instalación. Teniendo esta potencia en cuenta se ha seleccionado un motor eléctrico a modo de generador.

Una vez seleccionado el generador se han obtenido diferentes parámetros de la instalación como número específico de revoluciones, número de revoluciones mínimo para que el motor funcione como generador, la potencia eléctrica de la instalación y la curva caudal altura de la de la misma.

A continuación se han obtenido las dimensiones generales de la turbina a partir de tres métodos estadísticos. Combinando los resultados de los diferentes métodos se han obtenido los valores de las dimensiones generales de la turbina y mediante el diagrama de Cordier se ha verificado que el diámetro externo fuese adecuado.

A partir de todos los datos obtenidos hasta este momento se han calculado las dimensiones, ángulos y perfiles de los álabes.

Una vez definidas todas las dimensiones de la turbina, se ha procedido a modelarla en un entorno CAD, en este caso el software *SolidWorks*. Esta turbina se ha ensamblado con un eje de dimensiones arbitrarias y con una tubería de suficiente longitud con el fin de realizar la simulación de fluidos evitando errores derivados de un eje y tubería demasiado cortos (choques, remolinos, etc.) . Una vez finalizada la simulación se han determinado las dimensiones de dicho eje mediante los valores de tensión obtenidos.

Para realizar la simulación se han planteado diferentes escenarios, resultando en un total de veinte simulaciones de las cuales se han analizado los resultados.

Mediante la simulación se obtienen las curvas caudal altura de la turbina según las diferentes velocidades de giro, permitiendo hallar el rango de funcionamiento óptimo de la instalación. Dichas curvas han sido comparadas y verificadas mediante las leyes de semejanza.

De esta simulación se obtienen también los valores de tensión cortante máxima y par máximo los cuales se han tenido en cuenta a la hora de seleccionar material, realizando una simulación de la deformación mediante el módulo *Simulation* de *SolidWorks*.

Seguidamente mediante la herramienta *CESEdupack*, se realiza un estudio del material y del proceso de fabricación más adecuado.

Finalmente se realiza un presupuesto aproximado de los elementos principales del montaje.

Para complementar este estudio se ha diseñado el ensamblaje a grandes rasgos del grupo generador, aportando planos y un pliego de condiciones técnicas del mismo.

El resultado es un grupo generador capaz de generar energía en instalaciones con un salto de 2 a 6 metros.

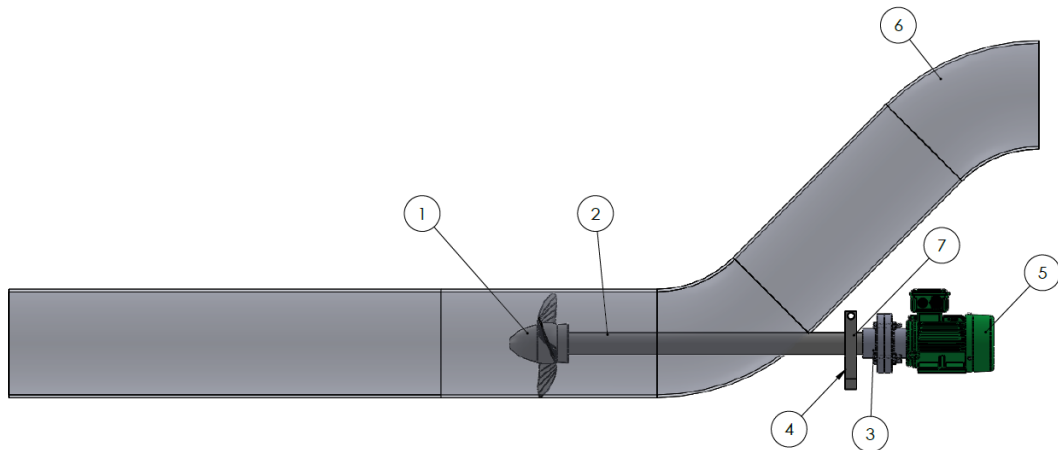


Figura 42 Ensamblaje completo

Este grupo generador se compone de los siguientes elementos:

1. Bulbo con hélice
2. Eje principal
3. Acoplamiento rígido
4. Soporte eje
5. Motor eléctrico a modo de generador
6. Conducción
7. Rodamiento

Para el detalle todos los elementos ver "ANEXO 6 PLANOS".



## 18. REFERENCIAS

- Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., Ramos, H. M., & López-Jiménez, P. A. (2017). Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability. *Water (Switzerland)*, 9(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w9020097>
- Binama, M., Su, W. T., Li, X. B., Li, F. C., Wei, X. Z., & An, S. (2017). Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(February), 148–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.071>
- ENERWATER. (2015). Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste water treatment plants, 1–16.
- Penín, C. P., Porto, E. S., & Barca, A. E. (2012). Máquinas hidráulicas de desplazamiento positivo. Vigo: Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo.
- Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F., Ramos, H., & López-Jiménez, P. (2017). Energy Recovery in Existing Water Networks: Towards Greater Sustainability. *Water*, 9(2), 97. doi:10.3390/w9020097
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2011). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Harlow: Pearson Education.
- Ruiz, A. A., & Falco, A. A. (2016). Parametrización Del Consumo Energetico De Las Depuradoras De Aguas Residuales (Levante Español). *Dyna Ingeniería E Industria*, 91(1), 82-87. doi:10.6036/7527
- Binama, M., Su, W., Li, X., Li, F., Wei, X., & An, S. (2017). Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 148-179. doi:10.1016/j.rser.2017.04.071
- El potencial de la micro hidráulica- Micro-turbinas hidráulicas. (2017, March 28). Retrieved from <https://tecnoturbinas.com/blog/potencial-la-energia-micro-hidraulica-redes-abastecimiento-agua>
- Samora, I., Hasmatuchi, V., Münch-Alligné, C., Franca, M. J., Schleiss, A. J., & Ramos, H. M. (2016). Experimental characterization of a five blade tubular propeller turbine for pipe inline installation. *Renewable Energy*, 95, 356-366. doi:10.1016/j.renene.2016.04.023
- Mataix, C. (1982). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Pumps as turbines in the water industry. (2016, May 10). Retrieved from <http://www.worldpumps.com/waste-wastewater/features/pumps-as-turbines-in-the-water-industry/>



Liu, H., Masera, D., & Esser, L. (2013). World Small Hydropower Development Report 2016. *International Network on Small Hydro Power*, 1–24. Retrieved from [www.smallhydroworld.org](http://www.smallhydroworld.org)

Andrés-Reig, D., & Pérez Sánchez, M. (2017). *Caracterización y modelización numérica del comportamiento de una válvula de esfera mediante CFD con validación experimental* (Trabajo Final de Grado). Universidad Politécnica de Valencia, Alcoy, España.

Micro hydro. (2018, July 27). Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Micro\\_hydro](https://en.wikipedia.org/wiki/Micro_hydro)

AEAS. Sala de prensa. Retrieved from [http://www.aeas.es/servlet/mgc?pg=ListNews&ret=next&news\\_id=1249&areaCode=publicarea&newsCategory=Noticias AEAS](http://www.aeas.es/servlet/mgc?pg=ListNews&ret=next&news_id=1249&areaCode=publicarea&newsCategory=Noticias AEAS)

Ángel Franco García (2010). Retrieved from [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din\\_rotacion/torsion/torsion.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/torsion/torsion.htm)

Hidroeléctrica, C., & Portillo, D. E. E. L. (2009). Contratación del Suministro, Montaje y Puesta en Marcha del GRUPO TURBINA – GENERADOR Y EQUIPOS AUXILIARES.

Pérez Piero. (2018). *Grupo Generación Kaplan Tubular*. Universidad Católica del Perú.

Navarro Alandete, F. (2018). *ANÁLISIS MEDIANTE CFD DE UNA BOMBA TRABAJANDO COMO TURBINA (PAT) CON CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL*. Universidad Politécnica de Valencia.

Andrés Reig, D. (2017). *Caracterización y modelización numérica del comportamiento de una válvula de esfera mediante CFD con validación experimental*. Universidad Politécnica de Valencia.