

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA
ÁREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MODELO NUMÉRICO CFD DE CANAL HIDRODINÁMICO Y MICROTURBINA DARRIEUS

AUTOR: Martín Fernández Calvo

TUTOR: Eduardo Álvarez Álvarez

COTUTOR: Joaquín Fernández Francos

JULIO, 2023



Declaración de Originalidad del Trabajo Fin de Máster

D./Dña Martín Fernández Calvo, con DNI 71734118-Q, estudiante del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo, declaro bajo mi responsabilidad que:

El Trabajo de Fin de Máster aquí presentado con título “Modelo numérico CFD de canal hidrodinámico y microturbina Darrieus” ha sido realizado bajo mi autoría, es original y que todas las fuentes utilizadas han sido debidamente citadas en el mismo.

Para que así conste, firmo la presente declaración.

En Mieres, a 07 de Julio de 2023.

Una firma manuscrita en tinta azul que dice "Martín".

Martín Fernández Calvo

71734118-Q

Relación del TFM con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Relación de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):



ODS con los que se relaciona el TFM:

El presente Trabajo Fin de Máster tiene relación con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En concreto, se trata de un trabajo de investigación en busca de modelos informáticos capaces de replicar condiciones de generación de energía renovable (ODS-7) que permitan reducir la huella de carbono (ODS-13). A su vez, estas investigaciones tienen como objetivo último implementar estos sistemas de microgeneración de energía en el mercado (ODS-9) para su aplicación en pequeños núcleos urbanos (ODS-11).



ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen del proyecto	8
Abstract	9
1.- Introducción	10
1.1.- Antecedentes	10
1.2.- Microturbinas hidrocínicas	11
1.2.1.- Definición.....	11
1.2.2.- Tipos.....	12
1.3.- Objetivos y alcances	13
2.- Descripción de los materiales	15
2.1.- Túnel hidrodinámico.....	15
2.2.- Turbina Darrieus	16
3.- Método numérico	20
3.1.- Introducción	20
3.2.- Modelización CFD.....	20
3.2.1.- Procedimiento de caracterización numérica	20
3.2.2.- Ecuaciones que describen el flujo.....	21
3.2.3.- Discretización de las ecuaciones.....	23
3.2.4.- Modelo de turbulencia	24
3.2.5.- Modelo de la superficie libre (VOF).....	24
3.3.- Caso particular	26
3.3.1.- Geometría.....	26
3.3.2.- Particiones e interfaz	28
3.3.3.- Mallado	29
3.3.4.- Modelización.....	31
3.3.5.- Condiciones de contorno y parámetros de resolución	31
4.- Simulaciones	33
4.1.- Procedimiento de simulación.....	33
4.2.- Simulaciones realizadas	33
5.- Análisis de resultados	35
5.1.- Análisis de presiones y velocidades.....	35



5.2.- Análisis de la superficie libre.....	38
5.3.- Análisis de potencia	40
6.- Conclusiones	42
7.- Trabajos futuros	43
8.- Referencias bibliográficas	44



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Turbinas de flujo axial: a) De eje inclinado, b) De amarre rígido, c) De generador no sumergido, d) De generador sumergido[4].	12
Figura 2. Turbinas de flujo cruzado y eje vertical: a) De eje plano, b) Darrieus, c) Darrieus de jaula de ardilla, d) Darrieus H, e) Gorlov, f) Savonius[4].	13
Figura 3. Túnel hidrodinámico del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la EPM [Elaboración propia].	16
Figura 4. Perfil NACA-0015 de 0.05 m de cuerda de álabe [Elaboración propia]	17
Figura 5. Características geométricas de la turbina Darrieus [Elaboración propia].	18
Figura 6. Geometría del túnel hidrodinámico [Elaboración propia].	26
Figura 7. Geometría de la turbina Darrieus (perfil NACA-0015) [Elaboración propia].	27
Figura 8. Representación geométrica de 3 álabes simétricos de perfil NACA-0015 [Elaboración propia].	27
Figura 9. Partición del tanque de tranquilización [Elaboración propia].	28
Figura 10. Partición del canal de ensayos y su ampliación [Elaboración propia].	28
Figura 11. Cuerpo de revolución de la turbina [Elaboración propia].	29
Figura 12. Interfaz o región de contacto entre turbina y canal [Elaboración propia].	29
Figura 13. Mallado del modelo tridimensional del túnel hidrodinámico [Elaboración propia].	30
Figura 14. Detalle de la planta del mallado del túnel hidrodinámico [Elaboración propia].	30
Figura 15. Mallado de la turbina Darrieus [Elaboración propia].	31
Figura 16. Presiones y velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ (sección transversal) [Elaboración propia].	36
Figura 17. Presiones y velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ (sección transversal) [Elaboración propia].	36
Figura 18. Velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ (sección longitudinal) [Elaboración propia].	37
Figura 19. Velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ (sección longitudinal) [Elaboración propia].	38
Figura 20. Superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].	38



Figura 21. Representación gráfica de las cotas de superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].	39
Figura 22. Superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].	39
Figura 23. Representación gráfica de las cotas de superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].	39
Figura 24. P_u vs n [Elaboración propia].	40
Figura 25. C_p vs TSR [Elaboración propia].	41



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones principales de la turbina Darrieus con perfil de álabe NACA-0015[15].	19
Tabla 2. Características del mallado. [Elaboración propia].	29
Tabla 3. Valores de interés en el cálculo. [Elaboración propia].	35



RESUMEN DEL PROYECTO

En la actualidad, nos encontramos ante una situación crítica de escasez de recursos fósiles y un excesivo aumento de la demanda energética mundial. Las energías renovables suponen un 21% de la producción energética mundial, siendo la más utilizada la hidroeléctrica con un 60% de producción total. En este contexto, surgen las turbinas hidrocínéticas como una alternativa sostenible y barata para suplir la demanda en puntos aislados de la red eléctrica convencional. El presente estudio permite descubrir sus clasificaciones, características, condiciones de operación, rentabilidad comercial, etc. Para ello, se realiza un modelo numérico CFD de un túnel hidrodinámico y una microturbina hidrocínética Darrieus de flujo cruzado. Finalmente, se comparan los resultados numéricos con resultados experimentales ensayados en el laboratorio de la EPM, se generan unas conclusiones y se plantean nuevas líneas de investigación futuras.



ABSTRACT

Currently, we are facing a critical situation of scarcity of fossil resources and an excessive increase in global energy demand. Renewable energies account for 21% of world energy production, with hydroelectricity being the most used with 60% of total production. In this context, hydrokinetic turbines emerge as a sustainable and cheap alternative to supply the demand in isolated points of the conventional electrical network. The present study allows discovering their classifications, characteristics, operating conditions, commercial profitability, etc. For this purpose, a CFD numerical model of a hydrodynamic tunnel and a cross-flow Darrieus hydrokinetic microturbine is made. Finally, the numerical results are compared with experimental results tested in the EPM laboratory, conclusions are drawn and new lines of future research are proposed.



1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Antecedentes

Actualmente, el mundo se enfrenta ante una situación de escasez de combustibles fósiles, elevados niveles de impacto ambiental, un alto coste de la producción energética y un preocupante aumento de la demanda energética mundial. Todo ello, hace inevitable el interés por la obtención y generación de energías hipocarbónicas, es decir, nuevos sistemas de generación eléctrica renovable alternativa, eficiente y de impacto ambiental prácticamente nulo.

La época de crisis sufrida a partir del COVID-19 por todo el mundo produjo una caída en la producción eléctrica y supuso un mayor endurecimiento en aspectos de restricciones ambientales. Uno de los objetivos marcados en este periodo fue el de mejorar y modernizar los equipos e infraestructuras de producción de energía ya existentes; es decir, utilizar la menor infraestructura posible y de la manera más inteligente. A pesar de ello, el sector de la energía hidroeléctrica demostró resistencia y flexibilidad en época de crisis; éste generó un record histórico de 4306 TWh.

En la actualidad, las energías renovables suponen un 21% de la producción energética mundial[1]. Además, la energía renovable más utilizada es la hidroeléctrica con aproximadamente un 60% de producción total de energía verde, aunque se prevé que para el 2050 se reduzca dando mayor protagonismo a la energía eólica y solar, que supone menores inversiones, mantenimiento e impacto ambiental.

Las turbinas hidrocínéticas ensayadas en canales, ríos o estuarios se postulan como una alternativa sostenible para suplir puntos aislados de la red eléctrica convencional[2]. Se trata de una opción económica, viable, de bajo coste inicial, fácil instalación y viabilidad de mercado positiva, reduciéndose así la huella hídrica asociada a presas y embalses. Por otro lado, otro factor en contra del uso de embalses es la pérdida de agua por evaporación, alcanzando niveles de un 10 % del nivel total del embalse[3]. Las eficiencias obtenidas de los ensayos actuales determinan límites de potencia máximos de un 70 % (superior al límite de Betz del 59 %), incluso del 81 %. La principal ventaja de la energía de corriente es su capacidad para ser predicha, aunque dependa de su localización y la estación.

Los primeros ejemplos de energía hidroeléctrica que podrían sustituir las grandes presas y embalses son las energías marinas: de corrientes, de mareas, de olas, variación del gradiente salino y diferencias de temperatura. Sin embargo, las turbinas hidrocínéticas ensayadas para corrientes cercanas a la costa no alcanzan un elevado grado de madurez, debido a sus bajos rendimientos a velocidades menores a 1 m/s; requerían velocidades de corriente de entre 2 y 5 m/s[4].

Más adelante, se ensayan los primeros prototipos de turbinas hidrocínéticas en canales, ríos y estuarios. Sin embargo, estos necesitaban lugares profundos de instalación que



requerían importantes inversiones en operación y mantenimiento; esta condición impedía su salida a mercado[5]. Actualmente, los estudios buscan alternativas viables de uso en condiciones de agua superficial[6].

El gran reto de las turbinas hidrocínéticas es que operen bajo velocidades de corriente reales (< 1 m/s). Además, un aspecto clave en la operación de la turbina es la presencia de bloqueo de flujo, que crea una aceleración en el flujo de la turbina aumentando su rendimiento en comparación con un flujo no confinado[7]. La predicción del coste de la energía producida, la energía potencial y su viabilidad económica dependerá de la intensidad de corriente, las propiedades del canal, el diseño del rotor y el valor de mercado de la energía[8]. El coste de generación de electricidad por turbinas hidrocínéticas oscila entre 80 y 125 \$/MWh[9].

Respecto a las expectativas de futuro, cabe destacar que se incrementa el interés por las energías verdes y con ello el número de estudios realizados. Se establecen dos líneas de trabajo; según la posición del eje de rotación con respecto del flujo, estudios de turbinas de flujo axial y de turbinas de flujo cruzado. Las turbinas de flujo cruzado son aquellas con mayor atractivo comercial, debido a su diseño compacto, listo para ser conectado a red y de funcionamiento automático. Por otro lado, el sector de la energía hidroeléctrica ayudará a generar unos 600.000 potenciales puestos de trabajo en los próximos 10 años, no sólo en construcción de plantas sino también en investigación.

1.2.- Microturbinas hidrocínéticas

1.2.1.- Definición

Las turbinas hidrocínéticas son aquellas que producen energía eléctrica directamente del flujo de agua de arroyos, ríos y canales en condiciones de baja velocidad de corriente y a bajo coste inicial y fácil instalación. Están basadas en mismos principios que las turbinas eólicas, pero con diferencias en las condiciones de operación[10]. Se trata de una excelente y sostenible alternativa para sustituir demandas en puntos aislados de la red, ya que pueden ser instalados en puntos cercanos a pequeñas poblaciones[11], prescindiendo del uso de embalses y minimizando la huella hídrica asociada a la generación hidroeléctrica convencional[12].

La potencia obtenida de la corriente de agua depende directamente de la densidad, el área barrida por los álabes, del cubo de la velocidad del agua y de la eficiencia de conversión del equipo[2]. Las turbinas hidrocínéticas son definidas también como aquellas de baja energía potencial (diferencia de cotas inferior a 0.2 m). La principal dificultad del aprovechamiento de potencia mediante estas turbinas es la de alcanzar velocidades de agua superiores a los 1.5 m/s. Debido a esto, es necesario en ocasiones instalar elementos auxiliares como aceleradores de flujo[11].

1.2.2.- Tipos

Las turbinas hidrocinéticas se clasifican en dos tipos principales en función a su disposición respecto de la dirección del flujo:

- Turbina de flujo axial.
- Turbina de flujo cruzado.

Las turbinas de flujo axial poseen el eje rotacional del rotor paralelo al movimiento del agua. Se disponen totalmente sumergidas y son más eficientes. Sin embargo, precisan de un complicado sistema mecánico para el acoplamiento del rotor con el generador. Además, deben estar ambos incluidos en una cápsula estanca, lo que supone un incremento del coste de construcción y mantenimiento.

A su vez, éstas se dividen en 4 tipos (Figura 1):

- Turbina de eje inclinado (usada en pequeños ríos).
- Turbina de amarre rígido.
- Turbina de generador no sumergido.
- Turbina de generador sumergido.

Las tres últimas son utilizadas en obtención de energía de mareas.

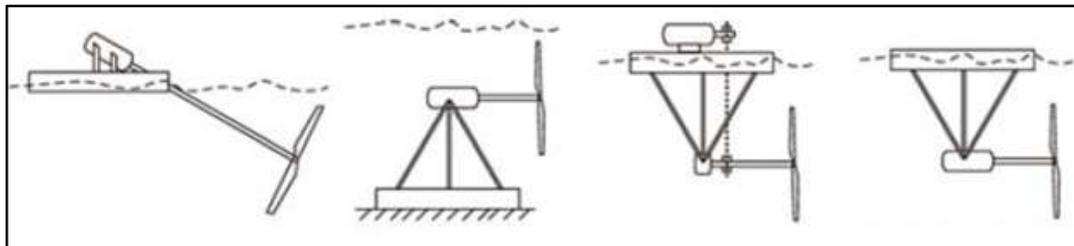


Figura 1. Turbinas de flujo axial: a) De eje inclinado, b) De amarre rígido, c) De generador no sumergido, d) De generador sumergido[4].

Las turbinas de flujo cruzado poseen el eje rotacional del rotor ortogonal a la dirección de flujo de agua. La principal ventaja que presentan es que pueden girar unidireccionalmente incluso con flujo bidireccional.

Se dividen en dos grupos:

- Turbina de eje vertical.
- Turbina de eje plano (eje en el plano) u horizontal.

Las turbinas de eje vertical disponen el eje perpendicular con el plano del agua. Se distinguen las diferentes turbinas de este tipo (Figura 2):

- Turbina de eje plano.
- Turbina Darrieus.
- Turbina Darrieus de jaula de ardilla.
- Turbina Darrieus H.
- Turbina Gorlov: álabes de estructura helicoidal

- Turbina Savonius: dispositivos de arrastre, que consisten en hojas rectas o inclinadas.

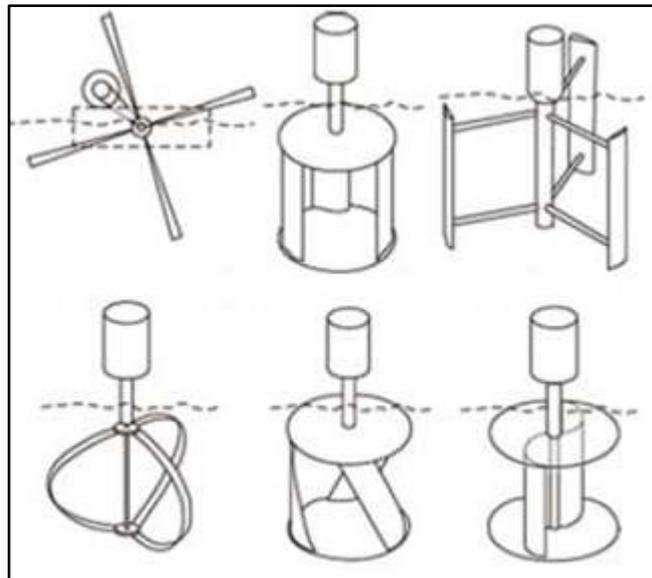


Figura 2. Turbinas de flujo cruzado y eje vertical: a) De eje plano, b) Darrieus, c) Darrieus de jaula de ardilla, d) Darrieus H, e) Gorlov, f) Savonius[4].

Las turbinas de eje vertical presentan diversas ventajas:

- No necesita orientación, cambia de dirección con el flujo.
- Facilita las labores de mantenimiento al poder disponerse de las etapas de producción de energía eléctrica fuera del agua en un sistema de flotación.

Pero las turbinas de eje vertical también poseen desventajas:

- Bajo par de arranque.
- Ondulación de par.
- Baja eficiencia.
- Pueden no tener par de arranque y es necesario adoptar algún mecanismo de arranque externo.

Las turbinas de eje plano poseen el eje dispuesto paralelo con el plano del agua. Son conocidas también como ‘norias flotantes’. Estas turbinas están basadas en arrastre, sin embargo, son menos eficientes que sus homólogos basados en elevadores. Tienen autoarranque y el problema de puesta en marcha no es significativo. Sin embargo, suponen un elevado coste debido al uso de generador sumergido o equipo de engranajes, así como la gran cantidad de material utilizado en la construcción de dichas turbinas[4].

1.3.- Objetivos y alcances

El objetivo principal de este trabajo fin de máster (TFM) es describir un modelo numérico de dinámica de fluidos computacional (CFD) de un canal hidrodinámico y una microturbina Darrieus. En el trabajo se describe la geometría, el mallado, la caracterización



numérica, las condiciones de contorno y los parámetros de resolución del modelo. A partir de diversas simulaciones, se obtienen resultados de presiones y velocidades, y potencias generadas que permiten caracterizar el funcionamiento de la turbina y la robustez del modelo.

En los últimos años, el departamento de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres (EPM) lleva realizando numerosos ensayos experimentales en el túnel hidrodinámico del laboratorio acerca de este tipo de turbinas y sus rendimientos. En este caso, se pretende realizar una modelización numérica de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del túnel hidrodinámico y turbina Darrieus que fue ensayada experimentalmente con anterioridad. El resultado del mismo es poder optimizar el proceso de actuación de las turbinas, escoger las mejores condiciones de contorno y ahorrar costes, mediante una caracterización del túnel y turbina robusta, la caracterización de la etapa de potencia CFD y la comparativa de resultados experimentales y numéricos.

Cabe destacar que la EPM y su equipo de profesores e investigadores han reflejado aquellos resultados obtenidos en diversos artículos. Muchos de ellos son fuente de inspiración del presente trabajo; más en concreto, el artículo ‘Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low scenarios’ (2021) sirve como apoyo para el posterior análisis de resultados y obtención de conclusiones.

Este caso permite estudiar la obtención de energía a velocidad inferiores a 1 m/s. Se trata de un modelo de escala, lo cual siempre obtiene energías superiores a las reales. Sin embargo, el logro de potencias a tan bajas velocidades supone un hito en la ingeniería hidráulica. Estos estudios colaboran en gran medida al desarrollo de las energías renovables, y sirven como apoyo energético en regiones y países subdesarrollados.



2.- DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES

2.1.- Túnel hidrodinámico

El modelo de túnel hidrodinámico introducido se trata de la representación del túnel instalado en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la EPM mediante el cual se realizan numerosos ensayos. El diseño de éste tiene como aspectos fundamentales la circulación de flujos de agua por su interior de baja velocidad de corriente (< 1 m/s), pruebas de coste reducido y ensayo de rotores de eje vertical[11].

La estructura principal es un canal de ensayos de sección rectangular y cristal laminado, permitiendo así la filmación de las pruebas, que posee las siguientes dimensiones principales: 1.5 metros de longitud, 0.3 metros de ancho y 0.55 metros de altura de pretil. Además, éste posee un sistema de rótula con tornillo que permite regular su inclinación desde un 0% hasta un 10% de pendiente[13].

Adicionalmente, posee dos conjuntos de elementos complementarios divididos en sistema mecánico e hidráulico y sistema de control electrónico.

Sistema mecánico e hidráulico:

- Tanque de aspiración: almacena el agua a la salida del canal; posteriormente, es recirculado al túnel para su reutilización. Está fabricado en acero inoxidable, por lo que es resistente a la corrosión; posee unos 4.8 m³ de capacidad y las paredes son de acero de 3 mm[13].
- Tanque de tranquilización: almacena y proporciona agua al canal de pruebas. Además, dispone en el interior de una serie de deflectores metálicos que permiten romper el flujo de agua, reduciéndose así turbulencias en el mismo. Está fabricado en acero inoxidable, posee unos 1.5 m³ de capacidad y las paredes son de acero de 3 mm.
- Compuerta de control: compuerta de tajadera de acero inoxidable, que permite modificar las alturas de salida y alcanzar las condiciones de flujo en el canal requeridas. La chapa es de acero inoxidable y posee 3 mm de espesor.
- Acople de turbinas: estructura de soporte que acopla los rotores de turbina a un eje de rotación metálico. Este esquema permite ensayar el rotor de turbina a diferentes alturas de lámina de agua, es decir, variando las características hidráulicas. Este elemento está fabricado en acero de alta resistencia (límite elástico de 1100 Mpa), permitiendo el doblado del material, ya que éste será sometido a grandes esfuerzos. Por último, para evitar su corrosión debido a la húmeda atmósfera, se le aplica pintura hidrófuga[13].
- Otros elementos auxiliares: tuberías, acoples, bridas, llaves, válvulas, manguitos anti-vibración[13].

Sistema de control electrónico:

- Sistema de bombeo: equipo formado por dos electrobombas centrífugas de 15 kW (total de 30 kW) en paralelo de caudal máximo 300 m³/h cada una; permiten extraer el agua del tanque de aspiración y reimpulsarla al tanque de tranquilización para ser empleada de nuevo. La bomba seleccionada es alimentada por corriente trifásica de 400 V con variador de frecuencia; se elige ésta, ya que permite bombear grandes caudales que no requieren de excesiva altura[14].
- Variador de potencia o caudales: secuenciador especializado en bombas hidráulicas; permite variar la velocidad de rotación de la bomba hidráulica mediante la variación de la frecuencia eléctrica. Además, se controla por pantalla y software e indica la potencia absorbida por el sistema.
- Software de toma de datos y software de análisis: sistema basado en metodología ‘Turbine Test Laboratory Equipment’ (TURTLE), la cual permite al usuario controlar la potencia extraída por la turbina, así como controlar las condiciones de velocidad aguas arriba y altura de lámina de agua.
- Conjunto de medidores: osciloscopio, multímetro, fuente de alimentación.

Se adjunta a continuación la imagen (Figura 3) del conjunto de elementos que conforman el túnel hidrodinámico.



Figura 3. Túnel hidrodinámico del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la EPM [Elaboración propia].

2.2.- Turbina Darrieus

La turbina objeto de modelización es construida y diseñada para ser probada en el canal hidrodinámico (canal abierto de superficie libre de agua) del laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la EPM. Se trata de un modelo de turbina Darrieus de 3 álabes de perfiles

NACA-0015 simétricos espaciados 120° [11], cuyas dimensiones principales son: 0.15 m de diámetro de rotor, 0.15 m de altura de turbina y 0.05 m de cuerda de álabes (solidez de 2). El modelo de turbina consiste en dos placas finales, tres álabes NACA, un sistema de sujeción de pinza ranurado y un soporte de rodamiento[15].

Los perfiles NACA simétricos tienen mejores rendimientos que perfiles asimétricos en condiciones de bloqueo; además, se sabe que aumentar el espesor de la pala es preferible desde el punto de vista de la separación (fenómeno crítico en escenarios de baja velocidad). Sin embargo, el aumento de espesor afectará negativamente el rendimiento de la turbina, por lo que será preferible un perfil intermedio que combine ambas ventajas[15]. En comparación con superficies aerodinámicas simétricas del 12 %, 15 % y 18 % de espesor, bajo condiciones de bajos números de Reynolds, el perfil NACA-0015 (Figura 4) obtiene valores óptimos para flujos de baja velocidad[16].

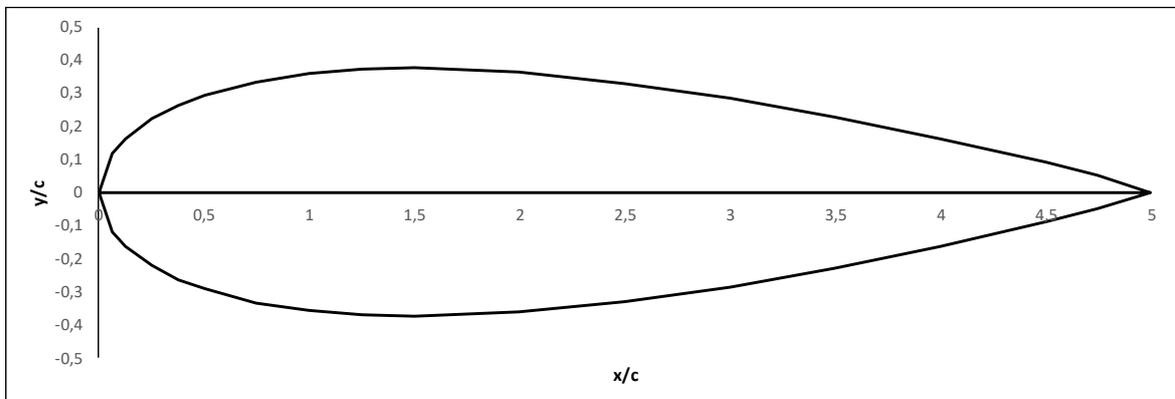


Figura 4. Perfil NACA-0015 de 0.05 m de cuerda de álabes [Elaboración propia]

Otro parámetro a definir es el ‘Turbine Aspect Ratio’ (TSR), el cual afecta al comportamiento de la turbina en condiciones confinadas y flujos de baja velocidad. En este caso, se fija en 1, de cara a mejorar la actuación de la turbina y obtener el mayor TSR[15].

$$TSR = \frac{\omega \cdot R_{tur}}{v} \quad (1)$$

Donde: ω (rad/s) es la velocidad rotacional de los álabes de la turbina, R_{tur} (m) es el radio de la turbina y v (m/s) es la velocidad del flujo aguas arriba de la turbina.

Otra problemática en el diseño del rotor es el autoarranque. Una solución simple y efectiva para combatir su bajo par de arranque es la de aumentar la longitud de la cuerda. Este aspecto es especialmente importante en modelos a escala donde el poder de autoarranque es insuficiente[15].

Cabe destacar que las dos placas finales (0.15 m de diámetro) juegan un importante papel soportando los álabes y mejorando su rendimiento hidrodinámico. Éstas, mejoran el flujo en la región cercana a la punta del álabes, evitando la fuga de presión hacia el lado de succión del álabes y reduciendo vórtices de la punta[15].

En cuanto a su construcción, se usa un software de diseño e impresión 3D, empleando como material el filamento de nylon (ácido poliláctico): material de alta dureza y flexibilidad, excelente durabilidad frente a ambientes húmedos y alta resistencia ante esfuerzos dinámicos continuos[11]. Gracias al uso de la impresión 3D, se ahorra 10 veces su coste en aluminio, no necesitando post procesado ni finalización de la superficie.

Por último, el eje de rotación metálico de 10 mm de diámetro mediante un sistema de cuñas y roscas, permite el intercambio de diferentes diseños de turbinas[11]. Además, con el objeto de aumentar la rigidez de las palas, se le añaden varillas de acero inoxidable de 3 mm de diámetro; esto le permite a la turbina colocarse a diferentes distancias del lecho del canal[15]. Se adjunta a continuación la imagen de la turbina Darrieus (Figura 5) y sus características geométricas.



Figura 5. Características geométricas de la turbina Darrieus [Elaboración propia].

Se adjunta también la tabla de las dimensiones principales de la turbina Darrieus (Tabla 1) ensayada de modelo ‘Micro Vertical Axis Tidal Turbine’ (MVATT).

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro de rotor	0.15	m
Altura	0.15	m
Perfil de álabe NACA-0015	50	mm



Longitud de cuerda	0.05	m
Solidez	2	adimensional
Número de álabes	3	adimensional
Diámetro de eje	0.01	m
Masa	0.3	kg
Momento de inercia	0.0052	Kg·m ²

Tabla 1. Dimensiones principales de la turbina Darrieus con perfil de álabes NACA-0015[15].



3.- MÉTODO NUMÉRICO

3.1.- Introducción

La resolución del problema se realiza mediante procedimientos basados en modelización numérica aplicando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), más en concreto el software ‘Ansys Fluent’. Se trata de la simulación de movimiento de fluidos y otros fenómenos asociados que no pueden ser vistos, tales como: distribución de presiones en el interior de la turbina, campos de velocidades relativas y absolutas, líneas de flujo, transferencias de calor, arrastres de sólidos, reacciones químicas, etc.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son aquellas que definen en cualquier punto la velocidad y presión de un fluido. Éstas derivan de las leyes de movimiento de Newton y son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Las ecuaciones son las mismas para cualquier situación de flujo de fluidos; sin embargo, cada caso es definido por unas condiciones de contorno y valores iniciales concretos. Las condiciones de contorno de las variables vienen definidas por la velocidad del agua y la presión, mientras que las condiciones de las superficies sólidas vienen definidas por la forma[13].

El uso del ordenador es capaz de resolver numéricamente el problema mediante CFD. Para resolver las ecuaciones, el programa transforma las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, y las resuelve en un número finito de punto del espacio. Cuántos más puntos posea la malla definida, el modelo posee mayor precisión, aunque también es más difícil de generar y resolver. Para que un modelo sea válido ha de ser robusto, es decir, debe tener correlación con los ensayos experimentales gracias a una correcta introducción de sus condiciones de contorno.

Actualmente, existen numerosos estudios CFD sobre modelización de turbinas de flujo cruzado. Su estudio se centra en la optimización del tamaño de álabes y en la consideración del efecto del bloqueo, dividiéndose éste último en la evaluación de la influencia de un deflector en la producción energética y de la influencia de la ubicación de la lámina libre en el rendimiento de la turbina[14].

3.2.- Modelización CFD

3.2.1.- Procedimiento de caracterización numérica

El usuario del software CFD debe introducir las condiciones, parámetros, geometría, ecuaciones de gobierno, etc. necesarios para encontrar la solución correcta al problema. Se especifican a continuación la secuencia de pasos de información introducida en el ‘Ansys Fluent’.

1. Se define un modelo geométrico de la turbina y del túnel hidrodinámico, introduciendo los contornos de dominio del problema.



2. Se crea el mallado geométrico de superficies y volúmenes en los que van a ser calculados las variables. Se selecciona el tipo y número de celdas que se adapte mejor a la geometría y condiciones de modelo, pudiendo disminuirse el tamaño de aquellas celdas que requieran de mayor precisión.
3. Se imponen las condiciones de contorno y valores de las variables en los dominios del problema. Éstas son la velocidad, la presión estática y total, el gradiente de dichas variables, así como las variables de turbulencia asociadas al modelo de turbulencia.
4. Se introducen las condiciones iniciales; se trata de un problema estacionario, por lo que es necesario introducir unos valores iniciales de las variables, mediante los cuales parte el proceso iterativo.
5. Se especifican las propiedades del fluido (viscosidad y densidad) y se introduce al programa el modelo matemático de variación, con sus parámetros correspondientes. También se puede considerar la transferencia de calor, por lo que se ha de determinar las propiedades térmica del fluido estudiado.
6. Se controlan los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema, como factores de relajación o criterios de finalización de las iteraciones.

3.2.2.- Ecuaciones que describen el flujo

El software CFD tiene como papel fundamental el de predecir cómo fluirá un fluido. Éste debe calcular soluciones numéricas a las ecuaciones de gobierno del flujo y para ello, debe entender las características básicas del flujo. Sabiendo que la masa de un fluido debe conservarse, la predicción numérica de los flujos debería ser sencilla.

Sin embargo, la presencia de turbulencia en un fluido supone problemas para el software a la hora de traducir las matemáticas en soluciones numéricas. Cada punto del flujo posee un efecto de turbulencia aleatorio, lo que hace muy complejo poder modelarse la turbulencia.

3.2.2.1.- Ecuaciones de Navier-Stokes

La mayoría de los algoritmos CFD tradicionales requieren de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S). En el proceso de solución, surgen dos cuestiones importantes:

- Las ecuaciones de N-S son no lineales.
- El acoplamiento presión-velocidad requiere una consideración especial.

Los detalles del proceso de solución dependen de las características del flujo a resolver. Además, el proceso de solución para un flujo incompresible puede ser muy diferente al de un flujo compresible; en este caso, se trata de agua (flujo prácticamente incompresible, densidad constante).



Las ecuaciones de N-S se fundamentan en dos ecuaciones, la de la cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad. La ecuación de la cantidad de movimiento se desarrolla a su vez en tres, una referida a cada dirección del espacio[17].

La ecuación de balance de la cantidad de movimiento (2ª Ley de Newton) en función de la velocidad y la presión:

$$\varphi \frac{D\vec{V}_i}{Dt} = \mu \nabla^2 \vec{V} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_\varepsilon \quad (2)$$

Que desarrollada para las 3 direcciones del espacio toma la siguiente forma:

$$\varphi \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = \mu (\nabla^2 V_x) - \frac{\partial p}{\partial x} + \varphi g_x \quad (3)$$

$$\varphi \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = \mu (\nabla^2 V_y) - \frac{\partial p}{\partial y} + \varphi g_y \quad (4)$$

$$\varphi \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \mu (\nabla^2 V_z) - \frac{\partial p}{\partial z} + \varphi g_z \quad (5)$$

Donde: $\varphi(x, y, z, t)$ es la densidad del fluido en el punto X en el instante t , V_i es la velocidad que tiene una partícula en cada punto X del espacio y cada instante de tiempo t , p es la presión en el seno del fluido, μ es la viscosidad del fluido, F_ε es el campo de aceleraciones debidas a las fuerzas externas (gravedad, presión y viscosidad) e i son los índices de x, y, z .

Y, como segunda parte, la ecuación de continuidad para un flujo incompresible:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Si se supone que la viscosidad no depende de la temperatura, ésta pasa a ser constante e independiente del resto de los parámetros físicos del sistema. Se dice que las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento se desacoplan de la ecuación de energía; el campo de flujo puede ser resuelto únicamente considerando las últimas ecuaciones[13].

3.2.2.2.- Ecuaciones de conservación general

Las ecuaciones de N-S se pueden expresar por medio de la ecuación de conservación general. Todas las expresiones que no son compartidas por todas las ecuaciones se engloban en el término fuente, para que todas las ecuaciones de gobierno del flujo tengan características comunes.



$$\frac{\partial(\varphi\theta)}{\partial t} + \text{div}(\varphi\theta\vec{v}) = \text{div}(\Gamma_{\theta}\text{grad}\theta) + S_{\theta} \quad (7)$$

Donde: θ es una propiedad cualquiera, Γ_{θ} es el coeficiente de difusión de dicha propiedad y S_{θ} es el denominado término fuente.

Los procesos físicos que intervienen en la variación de una propiedad fluida son: transitorio, convectivo, difusivo y de generación o disipación.[13]

El paso más importante de la resolución de la ecuación es su integración sobre un volumen de control dimensional[13]:

$$\int_V \frac{\partial(\varphi\theta)}{\partial t} dV + \int_V \text{div}(\varphi\theta\vec{v}) dV = \int_V \text{div}(\Gamma_{\theta}\text{grad}\theta) dV + \int_V S_{\theta} dV \quad (8)$$

Aplicando el teorema de divergencia de Gauss, la integral de volumen de los términos convectivo y difusivo se transforma en una integral superficial.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \varphi\theta dV \right) + \int_S (\varphi\theta\vec{v})\hat{n} dS = \int_S (\hat{\Gamma}_{\theta}\text{grad}\theta)\hat{n} dS + \int_V S_{\theta} dV \quad (9)$$

En este problema estacionario, se anulan los términos de variación temporal simplificándose la ecuación.

3.2.3.- Discretización de las ecuaciones

Para la resolución del problema, se realiza una discretización de las ecuaciones diferenciales obteniendo las ecuaciones ‘Reynolds-Averaged Navier-Stokes’ (RANS), mediante un esquema de segundo orden. Este esquema resuelve la corrección de velocidad y presión utilizando el método ‘Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations’ (SIMPLE); el objetivo final es resolver dichas ecuaciones en el mallado. El flujo se considera incompresible y la ecuación de la energía no se utiliza. Así, el método seleccionado utiliza las relaciones entre velocidad y presión para imponer la conservación de la masa y obtener el campo de presión[18].

Sin embargo, la complejidad de las ecuaciones supone la linealización y utilización de un método iterativo. Se parte de un valor que se aproxime a la solución; tras cada iteración o paso, fijado el criterio de convergencia, el proceso se acerca paulatinamente a la solución real. La solución final depende de:

- Las condiciones iniciales, es decir, el estado de las variables para el $t=0$.
- Las condiciones de contorno, o sea, valores de velocidad y presión en las fronteras del modelo (paredes, entrada y salida del flujo, etc.).



3.2.4.- Modelo de turbulencia

El problema estudiado se trata de un análisis dinámico en un modelo multifásico y con rotación de turbina. En éste, los aspectos más relevantes son la turbulencia y la selección del modelo óptimo. La aparición de turbulencias en el flujo añade complejidad a las ecuaciones, ya que induce la aparición de términos adicionales. Por ello, se realizan simplificaciones lineales de las ecuaciones mediante métodos numéricos. Una forma de simplificar las ecuaciones es tratar los términos adicionales como tensiones viscosas adicionales producidas por la turbulencia[13].

La aparición de fenómenos de turbulencia en las ecuaciones de N-S generan una pérdida de sentido físico a escala macroscópica debido a la imposibilidad de conocer con precisión las condiciones iniciales y de contorno; además, el flujo es sensible ante detalles incontrolables de estas condiciones. Estos cambios se magnifican en los modelos numéricos. La turbulencia aumenta los grados de libertad del flujo, lo que supone una pérdida de influencia de las condiciones iniciales sobre el sistema[19].

Un modelo turbulento es aquel procedimiento numérico que permite cerrar el sistema de ecuaciones de Reynolds para poder ser resuelto. Las ecuaciones de Reynolds se promedian en el tiempo para eliminar fluctuaciones de pequeña escala, obteniéndose como resultado un conjunto de ecuaciones que se resuelven más asequiblemente[13].

Este problema, se resuelve mediante el uso de parámetros estadísticos del campo de flujo; se resuelve mediante modelización a estadística global, que considera que los movimientos turbulentos tienen un campo aleatorio. En concreto, se utiliza el solucionador ‘Reynolds-Averaged Navier-Stokes’ (RANS) junto con el modelo de turbulencia ‘Shear-Stress Transport’ (SST) $k - \omega$. Este modelo plantea ecuaciones de transporte de energía cinética turbulenta y laminar, así como de velocidad de disipación de esa turbulencia. Tiene una excelente capacidad de predicción de fenómenos transitorios cuando el flujo pasa de régimen laminar a turbulento, y para representar fenómenos de desprendimiento ante gradientes de presión adversos[20].

3.2.5.- Modelo de la superficie libre (VOF)

Los flujos multifase son aquellos que poseen dos o más estados diferentes de material fluyendo juntos. Para modelar estos sistemas, se utilizan de nuevo los conceptos de conservación del momento, continuidad y conservación de la energía. La existencia de estos dos fluidos inmiscibles multifase supone una complejidad extra a su modelado numérico, ya que requiere ser caracterizada por medio de unas condiciones de contorno (posición, movimiento e influencia sobre el flujo).

Para obtener una correcta simulación, se deben realizar los siguientes pasos[13]:

- Definir aquellas ecuaciones que describan la posición y forma de las interfases.
- Crear el algoritmo que defina la posición de la superficie libre de agua en el tiempo.



- Aplicar las condiciones de contorno sobre las interfases definidas.

Para determinar la altura de lámina de agua se emplea el modelo ‘Volume of Fluid’ (VOF), que permite estudiar la interfase aire-agua de manera dinámica[21]. El modelo permite el seguimiento del comportamiento de la superficie libre aplicando una malla fija, denominado método Euleriano. El modelo VOF se fundamenta en un campo de presiones y velocidades (sin temperaturas) que diferencia las zonas de dominio en las cuáles se encuentran las fases; las nuevas variables proporcionan la posición de las superficies libres en el tiempo. Por ello, se puede determinar la curvatura y pendiente de la superficie en base a celdas vecinas[22].

En contrapartida, el modelo también presenta problemas de resolución y precisión. Debido a la gran diferencia de densidades entre fases, la sensibilidad frente al campo de presiones entre fases dificulta la convergencia en casos de campos de presión y velocidad acoplados. A pesar de ello, se trata de la alternativa más fiable para modelar flujos multifásicos, debido a su simplicidad, robustez y versatilidad[13].

El modelo VOF resuelve las ecuaciones de gobierno utilizando la aproximación ‘Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes (URANS) para cada celda del dominio.

En primer lugar, el modelo VOF resuelve las ecuaciones de conservación de la masa:

$$\frac{1}{\varphi_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \varphi_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \varphi_q U_q) \right] = S_q + \sum_{q=1}^n (Q_{qp} - Q_{pq}) \quad (10)$$

Donde: φ_q es la densidad del fluido de la fase q , α_q es la fracción volumétrica de la fase q , U_q es la velocidad de la fase q , Q_{qp} es el caudal másico desde la fase q hasta la fase p y viceversa y S_q es el término fuente de la fracción volumétrica de la fase q .

Seguidamente, se resuelve la ecuación de la conservación del movimiento para toda la mezcla:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi U) + \nabla \cdot (\varphi U U) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla U + \nabla U^T)] + \varphi g \quad (11)$$

En el primer miembro se tiene la variación temporal de cantidad de movimiento y el término convectivo. En el segundo miembro se tiene las variaciones de cantidad de movimiento debidas al gradiente de presión, el término viscoso debido a fuerzas superficiales, fuerzas volumétricas de gravedad y otras fuerzas adicionales (sustentación o arrastre).

Por último, aplicando el modelo VOF para toda la mezcla se calcula la ecuación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi_{mix} E_{mix}) + \nabla \cdot (U_{mix} (\varphi_{mix} E_{mix} + P_{mix})) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + S_h \quad (12)$$

Donde: E_{mix} es la energía interna promediada de la masa en la mezcla de fases, U_{mix} es la velocidad de la mezcla, ρ_{mix} es la densidad de la mezcla, K_{eff} es la constante de intercambio de calor efectiva, T es la temperatura y S_h es el término fuente de la energía[14].

La característica principal del algoritmo VOF es que debe mantener la discontinuidad de las fases. Éste debe lograr una interfase controlada; para su delimitación, se aplican dos algoritmos que calculan la variación de fracción de volumen de cada fase geoméricamente. Estos algoritmos son el ‘Simple Line Interface Method’ (SLIC) y el Piecewise Linear Interface Calculation’ (PLIC).

En el primer paso, se calcula posición de la interfase plana o lineal respecto al centro de la celda total o parcialmente llena de fluido. En el segundo, se calcula la fracción de volumen que atraviesa cada cara de la celda a partir de la posición de la interfase calculada y la información sobre las velocidades tangenciales y normales en las caras. Por último, se calcula la fracción de volumen de cada fase aplicando continuidad (balance de entradas y salidas); se trata de una iteración.

3.3.- Caso particular

3.3.1.- Geometría

La geometría total y su mallado, tanto del túnel hidrodinámico como de la turbina hidrocínética Darrieus se dibuja mediante la herramienta ‘Workbench 2022’, generándose diversos objetos gráficos: puntos, líneas, superficies y volúmenes, así como operaciones booleanas entre ellas. El modelo geométrico del túnel hidrodinámico (Figura 6) posee las mismas dimensiones reales que aquel instalado en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la EPM.

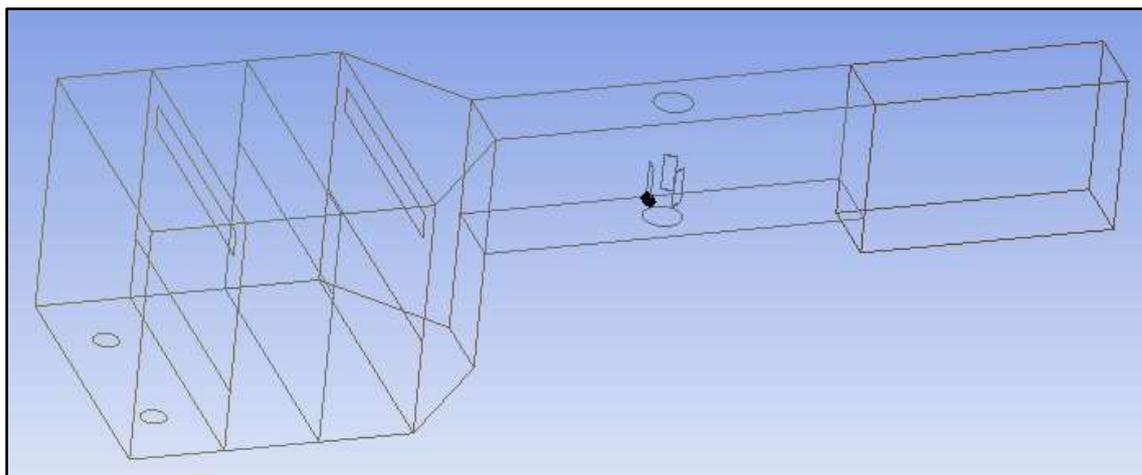


Figura 6. Geometría del túnel hidrodinámico [Elaboración propia].

. Además, el modelo de la turbina (Figura 7) también se trata de aquella turbina Darrieus de 0.15 m de diámetro, 0.15 m de altura, 0.05 m de cuerda de álabe y 3 álabes de perfil NACA-0015 (Figura 8). La entrada se produce a través de dos orificios de 110 mm de

diámetro, que simulan los tubos de impulsión. La salida posee una zona prismática que simula la descarga libre del túnel. Además, se añaden las placas de tranquilización en el interior del tanque de alimentación del canal.

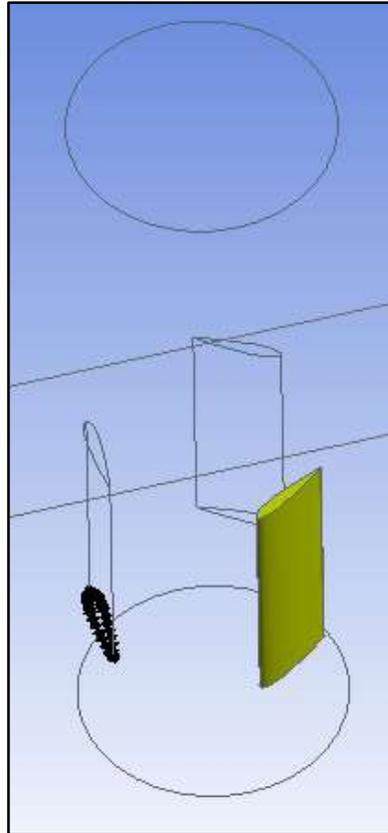


Figura 7. Geometría de la turbina Darrieus (perfil NACA-0015) [Elaboración propia].

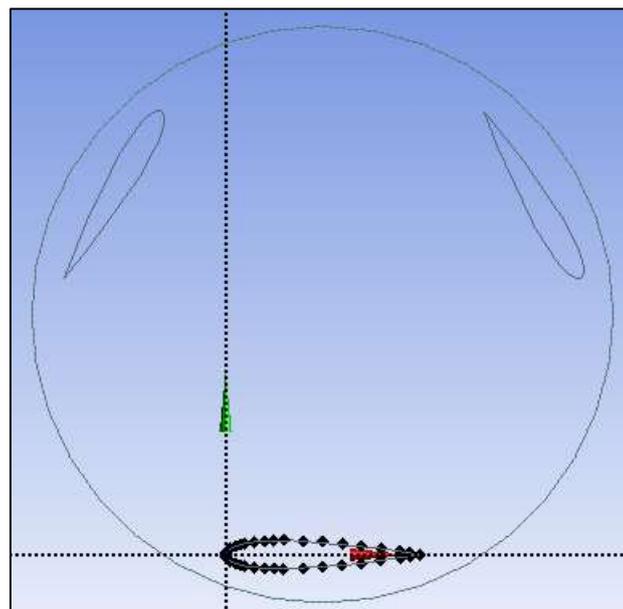


Figura 8. Representación geométrica de 3 álabes simétricos de perfil NACA-0015 [Elaboración propia].

3.3.2.- Particiones e interfaz

Previamente al mallado del modelo, es necesario definir en el programa informático las particiones de la geometría y las interfaces o regiones de contacto generadas.

Nuestro modelo está dividido en 3 particiones principales: tanque de tranquilización (Figura 9), canal de ensayos y una ampliación del canal real con el fin de darle continuidad al flujo de agua y obtención de resultados (Figura 10).

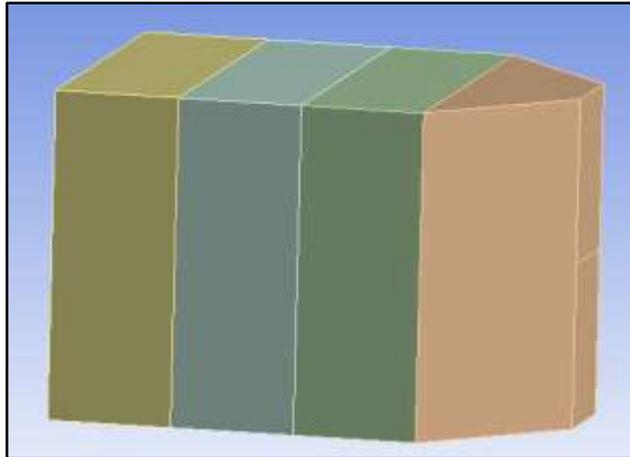


Figura 9. Partición del tanque de tranquilización [Elaboración propia].

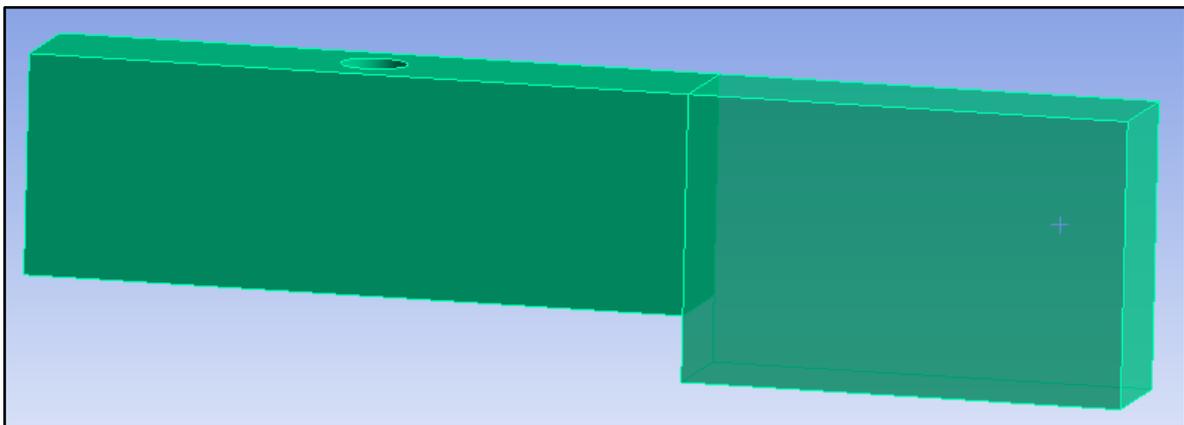


Figura 10. Partición del canal de ensayos y su ampliación [Elaboración propia].

Por otro lado, para poder mallar el entorno de la turbina y poder observar los fenómenos que ocurren en los álabes, se crea un cuerpo de revolución (prisma circular) de mismo diámetro que la turbina y de misma altura que el canal de ensayos (Figura 11).

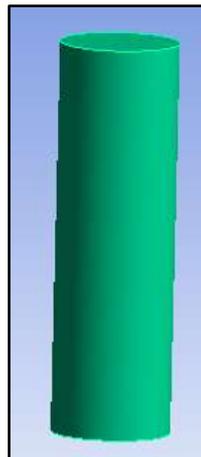


Figura 11. Cuerpo de revolución de la turbina [Elaboración propia].

Por último, es necesario eliminar las caras superpuestas entre las particiones, para permitir el flujo de agua entre ellas. Para el caso del cuerpo de revolución de la turbina, es necesario crear una interfaz (Figura 12) o región de contacto entre ella y el canal.

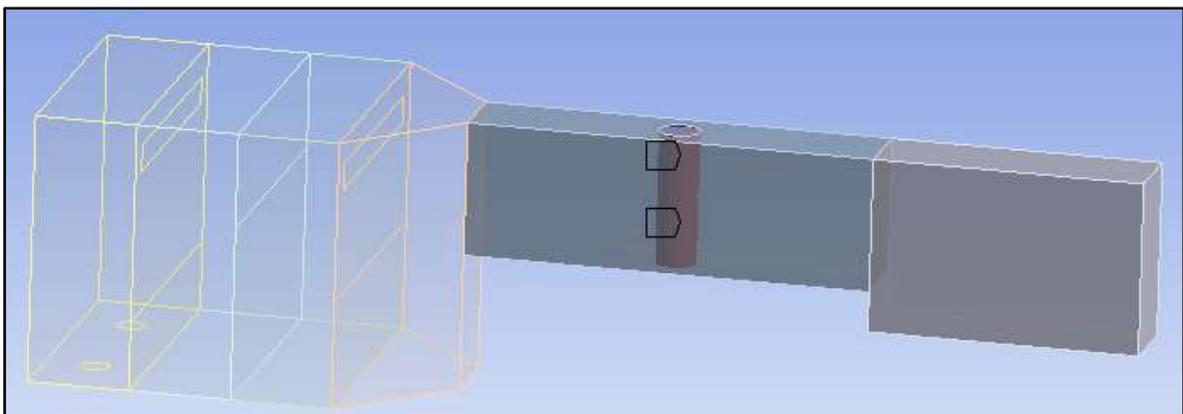


Figura 12. Interfaz o región de contacto entre turbina y canal [Elaboración propia].

3.3.3.- Mallado

El mallado del modelo se divide en dos tipos predominantemente. Por un lado, posee un mallado de tipo estructurado (rectángulos y paralelepípedos ordenados) en la zona del canal. Por otro lado, el tanque de tranquilización, la entrada de flujo al sistema y la turbina poseen un tipo de mallado no estructurado (triángulos o tetraedros sin orden matricial) (Figuras 13, 14 y 15). Se aprecian tamaños de mallado menores en zonas de mayor relevancia de cálculo, como la interfase creada por el cuerpo de revolución de la turbina o la entrada de agua al tanque de tranquilización ('inlet 1 e inlet 2').

Se añade una pequeña tabla resumen de las características (Tabla 2) del mismo.

Celdas	Caras	Nodos	Particiones
574462	1189095	110773	7

Tabla 2. Características del mallado. [Elaboración propia].

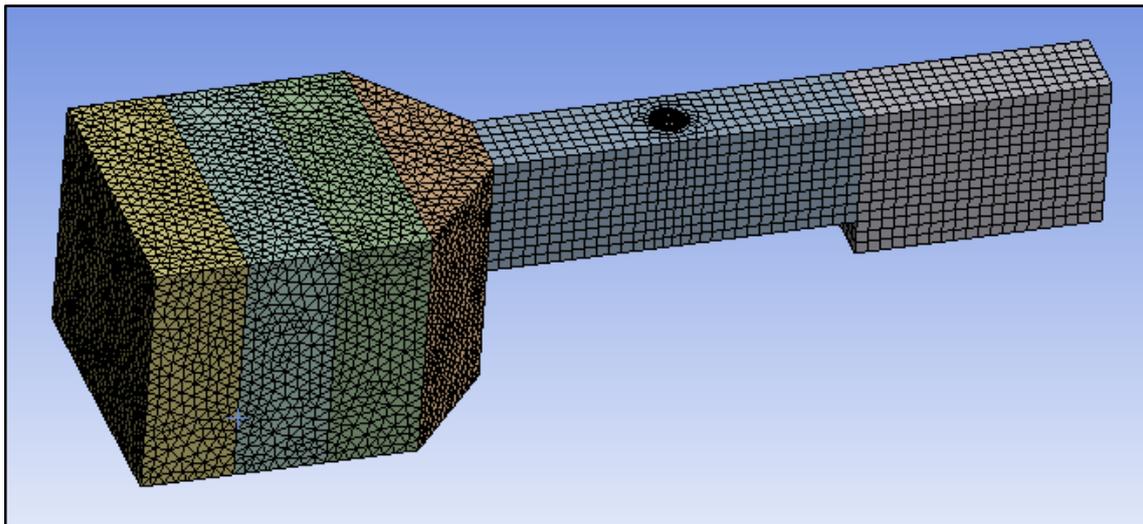


Figura 13. Mallado del modelo tridimensional del túnel hidrodinámico [Elaboración propia].

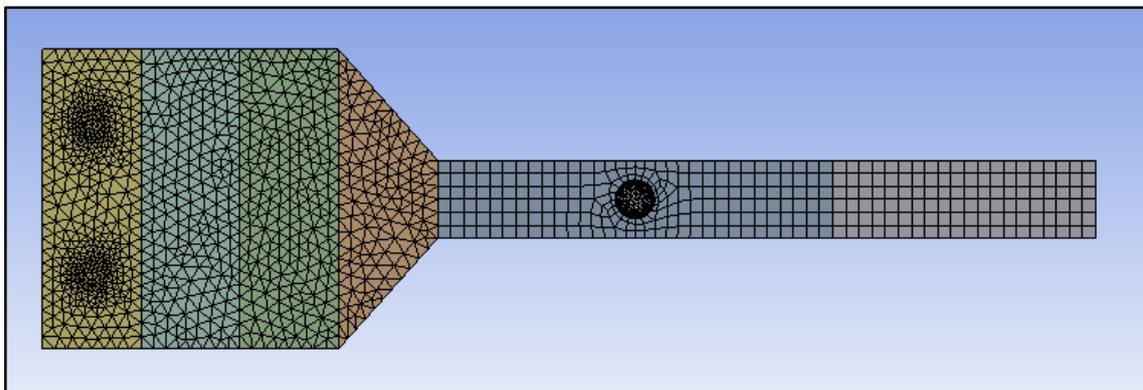


Figura 14. Detalle de la planta del mallado del túnel hidrodinámico [Elaboración propia].

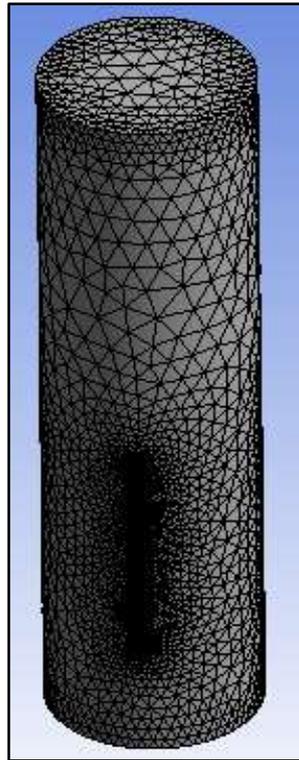


Figura 15. Mallado de la turbina Darrieus [Elaboración propia].

3.3.4.- Modelización

A continuación, se describen los pasos requeridos hasta obtener el modelo geométrico final:

- Se definen de los puntos o vértices que definen el contorno del túnel hidrodinámico.
- Se definen las líneas y aristas mediante la unión de sus vértices.
- Se definen las superficies.
- Se diseña el mallado; se definen el tipo de celdas, su tamaño o su espaciado entre ellas.
- Se comprueba la idoneidad del mallado.
- Se definen los contornos del modelo; se realiza especial hincapié en la correcta definición de las condiciones de contorno (entradas y salidas del sistema, y la interfaz del cuerpo de revolución de la turbina).
- Finalmente, se exportan el mallado y las condiciones de contorno al software de simulación 'Ansys Fluent'.

3.3.5.- Condiciones de contorno y parámetros de resolución

La simulación mediante métodos numéricos depende de una serie de condiciones de contorno y de parámetros de resolución concretos. Mediante el modelador de Ansys, se



deben definir las caras de los elementos principales para que éste las pueda interpretar, y asociar así las condiciones de contorno. A continuación, se especifican las principales paredes del modelo:

- ‘Inlet’: se selecciona el perímetro de los orificios de entrada de agua al modelo.
- ‘Outlet’: se selecciona la cara de canal de salida del flujo.
- ‘w-alabe’: se seleccionan las paredes de los álabes.
- ‘w-suelo’: se agrupan las caras correspondientes al suelo del canal.
- ‘if-turbina’: se define la interfaz turbina-canal.
- ‘w’: se define el resto de paredes del canal.

Aquellas paredes que no hayan sido seleccionadas las genera automáticamente el programa o las identifica como inexistentes. Esto ocurre con la parte superior del canal; al no seleccionar esta superficie como una pared, el programa identifica el modelo como abierto.

La principal complejidad del mallado reside en la interfaz canal-turbina. Se escoge el citado modelo multifase VOF que proporciona el cálculo de la superficie libre.

A continuación, se definen las condiciones de contorno. Se asigna la condición ‘wall’ a las paredes laterales y de fondo. La parte superior del canal se deja abierta, fijando una presión atmosférica estándar de 101325 Pa. El caudal de entrada por el fondo proporcionado por las bombas se define como ‘mass flow inlet’(kg/s).

Se definen también densidades y viscosidades constantes referidas al aire y al agua. Los valores de densidad para el aire y agua son de 1.225 kg/m³ y de 998.2 kg/m³ respectivamente. Los valores de viscosidad dinámica para el aire y agua son de $1.789 \cdot 10^{-5}$ kg/m·s y de $1.003 \cdot 10^{-3}$ kg/m·s respectivamente[13].

Como se comenta anteriormente, el flujo se considera incompresible y la ecuación de energía no se utiliza, por lo que se emplea el algoritmo SIMPLE; utiliza la relación entre las correcciones de velocidad y presión para imponer la conservación de la masa y obtener el campo de presión. Para la discretización espacial, se emplea la metodología PRESTO, que resulta más adecuada para gradientes de presión pronunciados en flujos turbulentos[23].



4.- SIMULACIONES

4.1.- Procedimiento de simulación

Se describe a continuación el conjunto de pasos realizados para la obtención de los resultados:

- Se diseña el modelo geométrico y posteriormente el modelo tridimensional, fiel a las dimensiones reales del túnel hidrodinámico y de la turbina.
- Se diseña el mallado (tipo de celdas, número, separación entre ellas) y se refina la misma en zonas cuyo cálculo sea más exhaustivo.
- Se asignan valores a las propiedades de los fluidos (viscosidad y densidad).
- Se introducen las condiciones de contorno: caudal de entrada, presión de salida. También se introducen los parámetros de turbulencia.
- Se introducen las condiciones iniciales, es decir, se definen valores de partida que el programa toma para poder progresar, así como pasos temporales de cálculo.
- Se definen parámetros de resolución numérica iterativa: pasos temporales, factores de relajación y criterios de convergencia.
- Se inicializa la simulación de flujo de fluido y se procede al calcular los resultados.
- Se generan los resultados finales. A partir de ellos, se realiza el tratamiento numérico y gráfico de la información obtenida. Finalmente, se realiza un análisis final de los resultados y se comparan con aquellos resultados experimentales obtenidos con anterioridad.

4.2.- Simulaciones realizadas

El modelo experimental objeto de comparación ensayó tres caudales en el canal: $Q_1 = 0.050 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2 = 0.060 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de estos caudales y con el área de la sección de flujo aguas arriba de la turbina en nuestro modelo numérico, que se mantiene constante (0.5 m), se obtienen las diferentes velocidades de sección aguas arriba: $v_1 = 0.333 \text{ m/s}$, $v_2 = 0.400 \text{ m/s}$ y $v_3 = 0.433 \text{ m/s}$.

El resultado de las simulaciones siempre será valores de par. Mediante este par y su velocidad rotacional correspondiente, es posible obtener la potencia útil de la turbina (P_u), es decir la potencia mecánica sin tener en cuenta las pérdidas mecánicas (rozamiento de cojinetes) e hidráulicas (rozamiento del agua debido a la rugosidad de los álabes).

$$P_u = \omega \cdot T \quad (13)$$



Donde: T (N·m) es el par motor, que mide el momento de fuerza que es aplicado a un eje que gira sobre sí mismo a una determinada velocidad.

Estos valores de potencia mecánica se comparan con los valores de potencia hidráulica (P_h) aguas arriba de la turbina.

$$P_h = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (14)$$

Donde: ρ (kg/m³) es la densidad del agua y A (m²) es la sección de flujo de la turbina

El resultado de este cociente es el coeficiente adimensional de potencia C_p , cuyo valor estima el rendimiento de la turbina en la extracción de energía.

$$C_p = \frac{P_u}{P_h} \quad (15)$$

También se obtiene el TSR. Éste permite caracterizar el funcionamiento del modelo y posteriormente será comparado mediante gráficas con los valores de C_p .

Gracias a los resultados experimentales, se sabe que las potencias útiles máximas se obtienen entre velocidades rotacional n de entre 100 y 200 rpm. Por ello, se proponen cinco valores de entre 100 y 180 rpm, a razón de 20. Éstas, expresadas en rad/s son introducidas en las condiciones iniciales del modelo numérico con el fin de obtener los valores de par, y posteriormente realizar el análisis de resultados.

En los apartados siguientes, se comparan los valores de potencia útil obtenidos frente a sus velocidades rotacionales (P_u vs n) y los valores adimensionales de coeficientes de potencia y TSR (C_p vs TSR).



5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado, se analiza el comportamiento general de la turbina en el modelo numérico CFD. Se obtienen resultados de presiones y velocidades, así como potencias extraídas del modelo y rendimientos finales.

En el laboratorio, la altura de sección aguas arriba de la turbina, se puede variar para obtener diferentes velocidades aguas arriba (V_{ar}). Sin embargo, el modelo CFD mantiene invariable esa altura de sección, y por tanto área de paso de sección constante (0.15 m^2).

El programa vierte unos valores promedio de par (T), y por tanto se obtienen la potencia mecánica y los C_p máximos aproximadamente.

Se añade una tabla (Tabla 3) con datos de interés de cálculo.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	1000	kg/m^3
Área de paso de turbina	0.0225	m^2
Radio de turbina	0.075	m
Área de paso aguas arriba	0.15	m^2

Tabla 3. Valores de interés en el cálculo. [Elaboración propia].

5.1.- Análisis de presiones y velocidades

En el presente apartado, se presentan a modo de ejemplo distintos análisis de la variación de presiones y velocidades en el entorno de la turbina, que pueden ser realizados gracias a las simulaciones efectuadas utilizando el modelo numérico.

Por ejemplo, se analizan las variaciones de presiones y velocidades para dos diferentes velocidades rotacionales, el caudal Q_3 y una misma posición de los álabes frente al flujo de agua (Figuras 16 y 17).

Para poder realizar un análisis cualitativo de los fenómenos que ocurren en el entorno de los álabes de la turbina, se realiza un corte transversal a lo largo de la misma por la parte central (altura de $0,075 \text{ m}$ respecto de la base de la turbina).



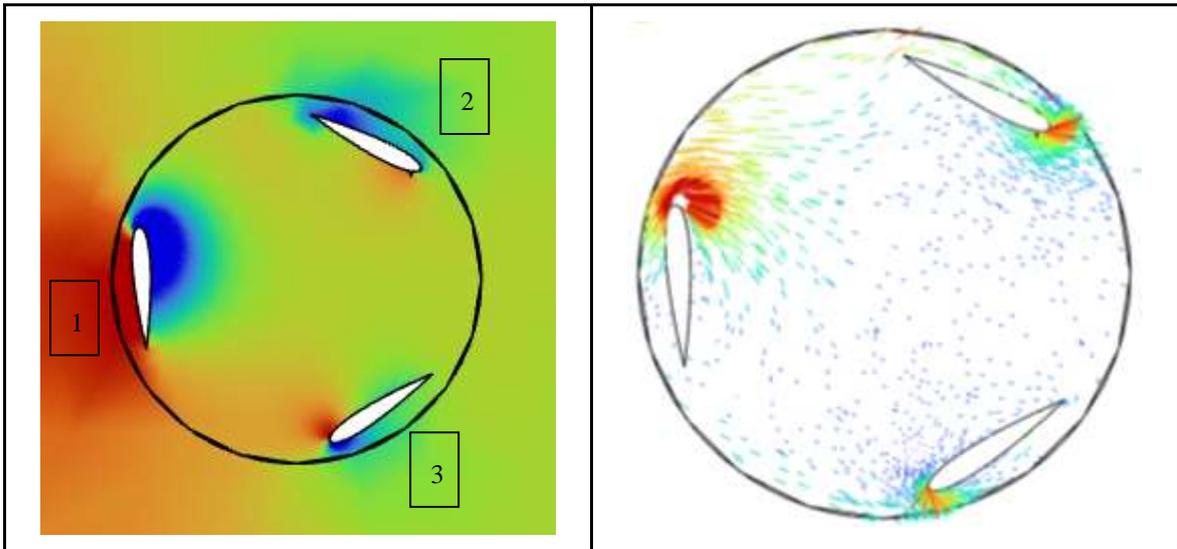


Figura 16. Presiones y velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ (sección transversal) [Elaboración propia].

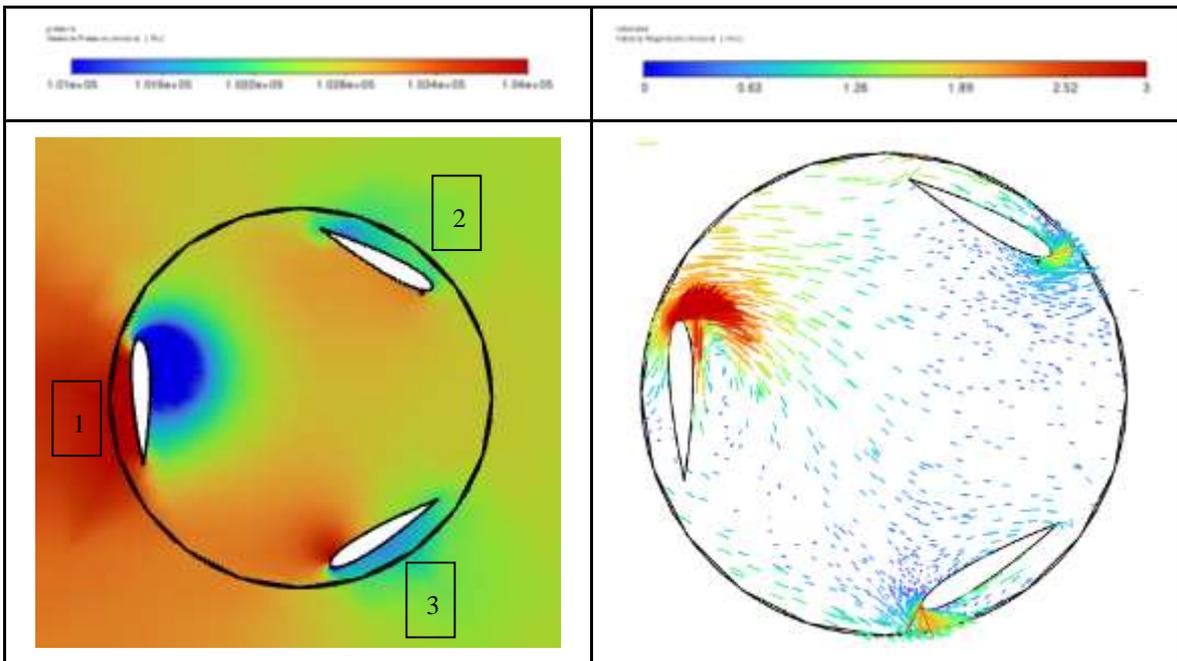


Figura 17. Presiones y velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ (sección transversal) [Elaboración propia].

Analizando los campos de presiones y velocidades alrededor de los álabes se pueden determinar zonas donde se mantiene el principio de conservación de la energía -subidas o bajadas de la velocidad se convierten en bajadas o subidas de presión respectivamente- y aquellas en las cuales el flujo pierde energía debido a una bajada conjunta de velocidad y presión.

Las presiones que se generan en las caras de cada álabe de la turbina, dan lugar a dos tipos fuerzas sobre estos, denominadas: fuerzas de sustentación y fuerzas de empuje. En cada álabe es normal que coexistan ambos tipos de fuerzas.

Las fuerzas de sustentación tienen una dirección perpendicular a la dirección del flujo, es decir, a la velocidad incidente, mientras que las fuerzas de empuje tienen la misma dirección que el flujo.

A continuación, se enumeran los álabes y se estudia el comportamiento de cada uno de ellos y de una manera aproximada y cualitativa las fuerzas que actúan en él.

1. En posición nº 1, el álabe se encuentra totalmente perpendicular a la dirección del flujo. Por tanto, este “choca” contra la cara más alejada al eje disminuyendo la velocidad drásticamente y aumentando la presión (se genera lo que se denomina un punto de estancamiento) apareciendo una importante fuerza de empuje, mientras que en la cara opuesta el flujo circula en una zona de este a alta velocidad reduciendo por tanto los valores de presión (cercana a 0) y generando en esa zona una fuerza de sustentación. Por tanto, el álabe estará sometido a una combinación de fuerzas de empuje y sustentación.

2. Las posiciones nº 2 y nº 3 el flujo de agua se adapta en mayor grado a la forma del álabe en la cara más cercana al eje generando un ligero (en este caso) incremento de presión (pequeña fuerza de empuje), mientras que en la cara más alejada del eje aparecen zonas de elevada velocidad y baja presión (fuerza de sustentación). Por tanto, en este caso las fuerzas de sustentación son predominantes frente a las de empuje.

A continuación, se analizan las velocidades (Figuras 18 y 19) en un corte transversal de la turbina utilizando un plano que pasa por el eje de la turbina.

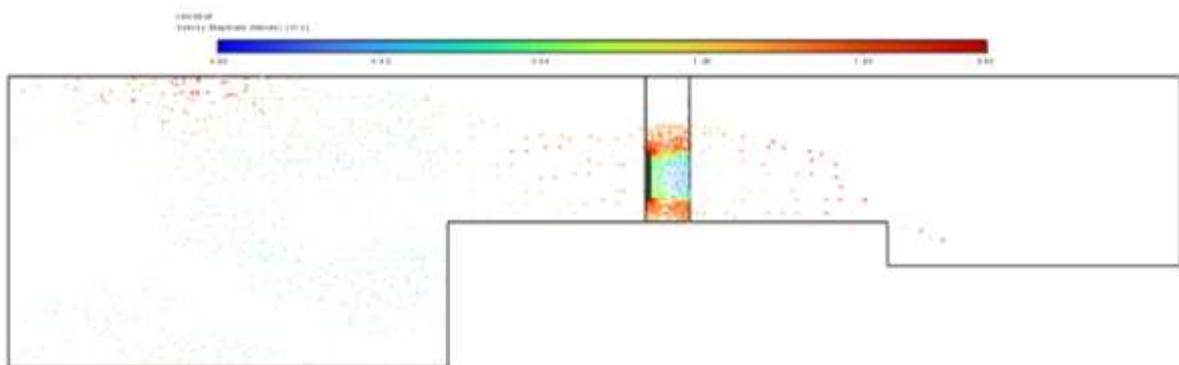


Figura 18. Velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ (sección longitudinal) [Elaboración propia].

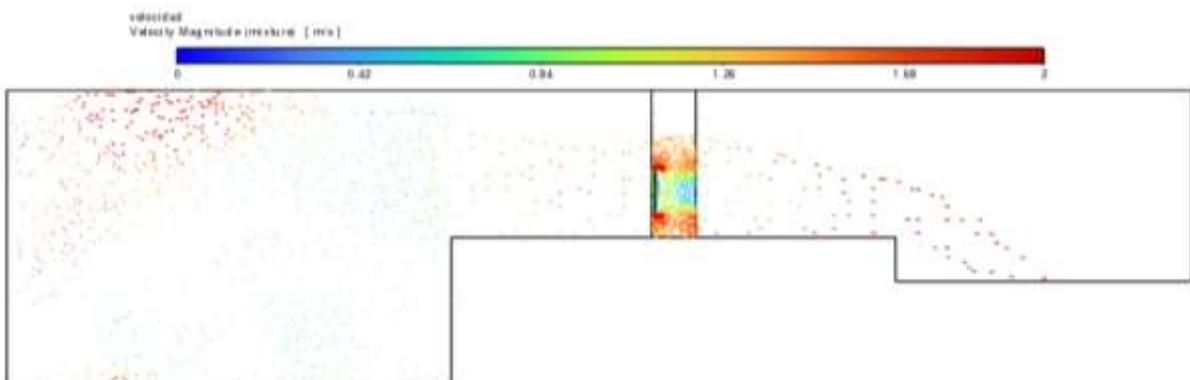


Figura 19. Velocidades para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ (sección longitudinal) [Elaboración propia].

Independientemente de la velocidad de giro de la turbina, existe una aceleración en la zona entre la turbina y la superficie libre del agua y entre turbina y solera del canal a consecuencia del bloqueo impuesto por la turbina.

5.2.- Análisis de la superficie libre

En el apartado siguiente se representan dos superficies libres generadas en el canal, para un mismo caudal y diferentes velocidades rotacionales (Figuras 20 y 22).

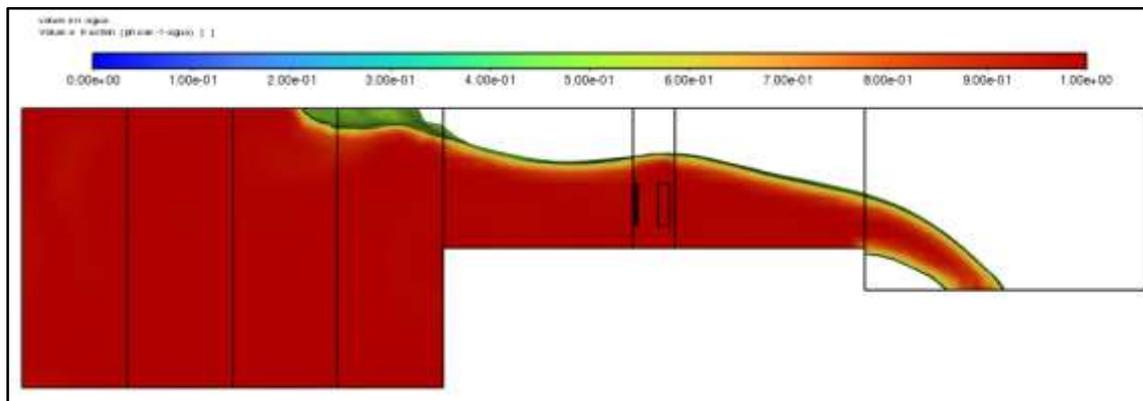


Figura 20. Superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].

Se representa a continuación las cotas de superficie libre del flujo (Figuras 21 y 23). Cabe destacar que tanto la medida horizontal como las cotas de superficie libre están referenciadas al eje de la turbina.

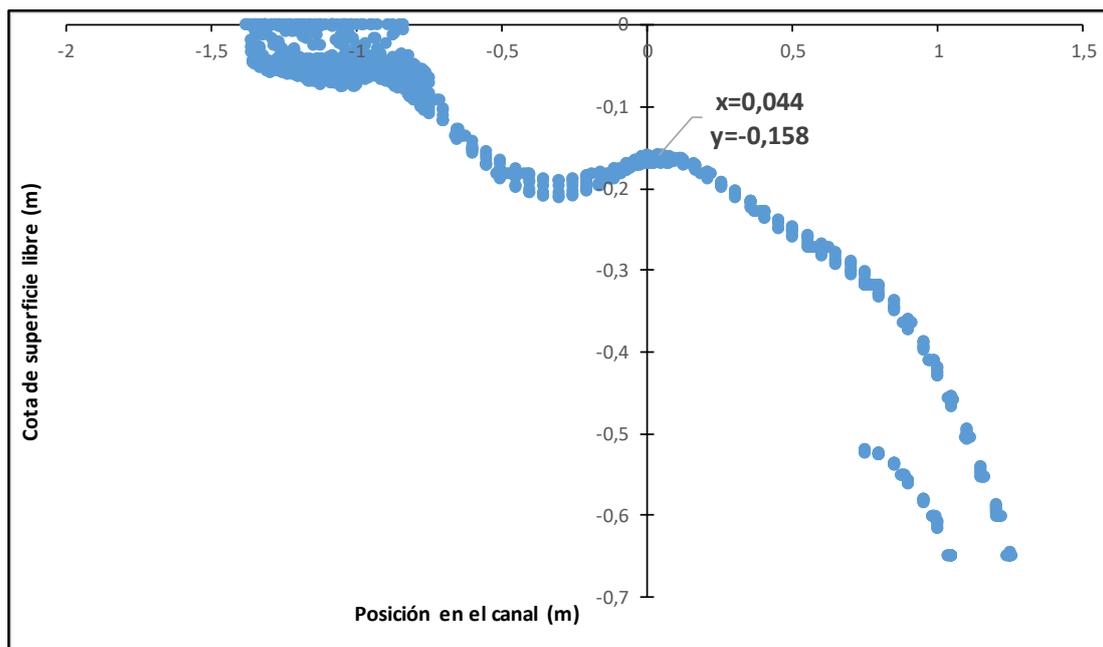


Figura 21. Representación gráfica de las cotas de superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_5 = 180 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].

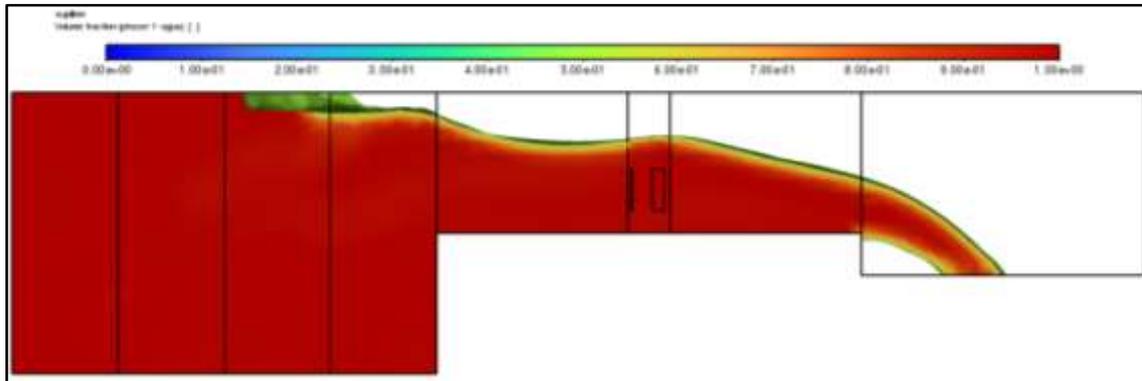


Figura 22. Superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].

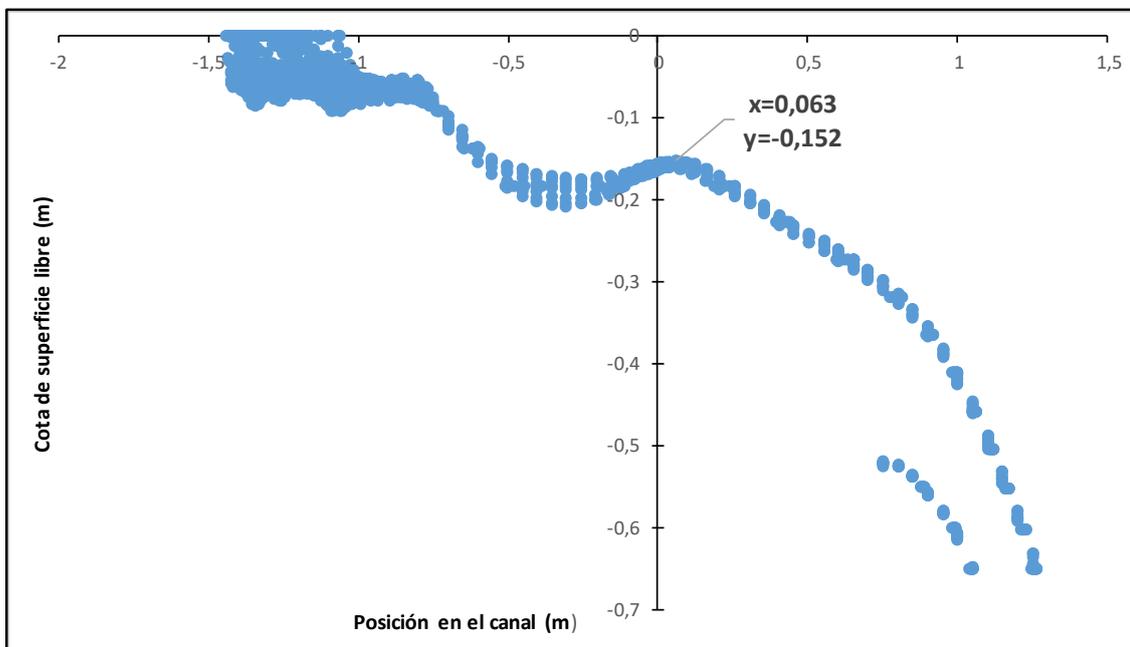


Figura 23. Representación gráfica de las cotas de superficie libre para $Q_3 = 0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidad rotacional $n_2 = 120 \text{ RPM}$ [Elaboración propia].

El efecto derivado del bloqueo en el flujo debido a la presencia de la turbina, implica una elevación de la superficie libre en su entorno. Además, como se puede observar (Figuras 21 y 23), a medida que disminuye la velocidad rotacional para un mismo caudal, se produce un incremento en la cota de la superficie libre de agua.

Esto tiene que ver con la energía obtenida por la turbina la cual es una combinación entre energía cinética y potencial, y justifica que, al disminuir la velocidad de rotación, manteniendo el caudal (y por tanto la velocidad del agua según se ha realizado la simulación) aumenta la variación de energía potencial que es aprovechada por la turbina y por tanto la potencia generada.

5.3.- Análisis de potencia

En este apartado se realiza un análisis de la potencia extraída de la turbina para distintas velocidades de rotación y caudales simulados. Se presentan los datos correspondientes a potencias próximas al punto de máxima potencia (en inglés *Maximum Power Tracking* o MPP) al ser éste el verdaderamente interesante en la operación de la turbina y en el cual deberá funcionar durante su operación normal gracias a sistemas de control (comerciales) denominados *Maximum Power Point Tracking* o MPPT, (Figura 24).

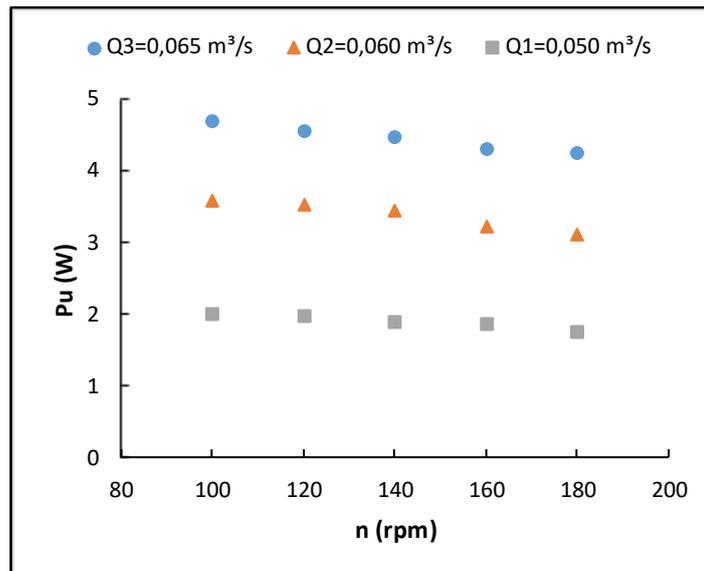


Figura 24. Pu vs n [Elaboración propia].

Para un mismo caudal, se observa un aumento de potencia útil obtenida para velocidades rotacionales menores hasta llegar al MPP donde la turbina se para súbitamente al desaparecer las fuerzas de sustentación sobre los álabes. A su vez, a mayor caudal se obtienen mayores potencias para una misma velocidad rotacional.

Si se adimensionalizan los resultados se pueden obtener las curvas características correspondientes a los coeficientes de potencia C_p frente a los valores de TSR (Figura 25).

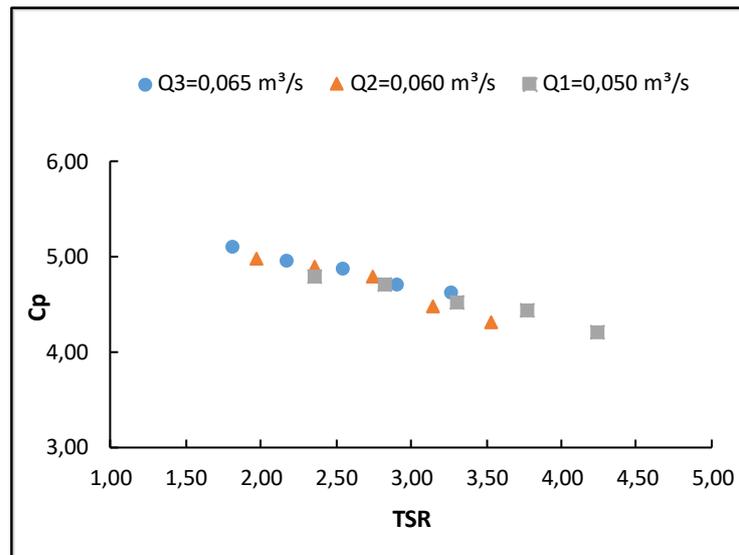


Figura 25. C_p vs TSR [Elaboración propia].

Se observan valores de C_p muy elevados, muy por encima del límite de Betz (0,59) ya que Betz únicamente valora campo abierto, sin limitación de flujo y aprovechamiento de energía cinética. En este caso de flujo en canales tener en cuenta que el flujo está limitado por la solera del canal, cajeros y superficie libre. Por ello, en estos casos la teoría del límite de Betz no es aplicable.

En el caso analizado se aprovecha tanto energía cinética como energía potencial provocado por el paso del agua sobre la turbina, que bloquea parcialmente la sección del canal.

Por último, hay que indicar que este modelo numérico de turbina no contempla pérdidas mecánicas, ni hidráulicas en los álabes (rozamiento), que derivarían en valores potencia y de C_p mucho menores.



6.- CONCLUSIONES

El presente proyecto tiene como objeto fundamental demostrar la obtención de potencia eléctrica bajo flujo de baja velocidad (<1 m/s), mediante el ensayo numérico de una turbina hidrocíntrica Darrieus de eje vertical y flujo cruzado. Este proceso se puede considerar un hito en la generación de energía hidroeléctrica, ya que, aunque sea baja, puede ser rentable muy próximamente; además, no requiere de mantenimiento exhaustivo ni de grandes inversiones iniciales.

Este estudio recopila información teórica y práctica de numerosos proyectos. Sobre todo, está basado en aquellos estudios realizados por el departamento de Ingeniería Hidráulica de la EPM, que también versan sobre microgeneración, modelización numérica CFD, turbinas hidrocíntricas de eje vertical y caracterización de la etapa de potencia de la turbina. Además, se comparan los resultados obtenidos en este modelo numérico con los ensayos experimentales realizados y plasmados en el artículo ‘Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low scenarios’ (2021).

En primer lugar, se realiza un análisis del contexto social y económico en relación con la energía y su producción y se definen las microturbinas hidroeléctricas y sus características. A continuación, se describe detalladamente los materiales utilizados en laboratorio y que posteriormente se caracterizan en el modelo. Seguidamente, se presentan las bases del modelo numérico, incluyendo tanto la formulación que lo rige como las condiciones iniciales y de contorno de nuestro caso concreto. También se describe el procedimiento de simulación y las simulaciones realizadas. Finalmente, se realiza un análisis de los resultados numéricos obtenidos.

Se puede concluir que el modelo es más o menos robusto, pero es necesario ensayarlo para mayores velocidades y mayores caudales. Otro factor clave en la obtención de mayores resultados de coeficientes de potencia es el efecto de bloqueo. La propia turbina situada en un canal provoca un bloqueo por su presencia, que mejora las prestaciones del dispositivo. En un canal real, estas condiciones de bloqueo no son equivalentes y será necesario aplicar métodos de corrección para corregir los efectos de bloqueo. Los valores lógicos de coeficiente de potencia son menores a la unidad.

En conclusión, las líneas de investigación aún son muy incipientes, pero poco a poco se está más cerca de enviar al mercado prototipos de turbinas hidrocíntricas de flujo cruzado competitivas económicamente.



7.- TRABAJOS FUTUROS

Las líneas de trabajo futuras con respecto a las microturbinas hidrocínicas desembocan en estudios del funcionamiento de los dispositivos ante condiciones de bloqueo. Estas condiciones son necesarias para que puedan adquirir una rentabilidad comercial suficiente. Se deben por tanto plantear y estudiar la aplicación de posibles métodos de corrección del bloqueo, tanto en campo abierto como en campo cerrado.

Otra opción a contemplar es lanzarse a instalar prototipos a escala en ubicaciones reales; una vez realizados ensayos en laboratorio y numéricos de condiciones tipo de canales, es necesario realizar una optimización personalizada del dispositivo para las localizaciones concretas. La EPM ha escogido dos ubicaciones reales bajo condiciones de bloqueo para instalar sus turbinas impresas en 3D. La primera de ellas es un canal de abastecimiento de difícil acceso, bajo una velocidad de 0.5 m/s. La segunda se trata de una salida de estación depuradora de aguas (EDAR), que requiere de condiciones de bloqueo debido a su baja velocidad (0.3 m/s). A estos prototipos se les añade monitorización, tanto de la calidad de agua como factores clave como el autoarranque de la turbina.

Por último, existen otras líneas que estudian el fenómeno de bloqueo bajo el uso de deflectores; se analiza cómo afectan en la fase de potencia del rotor, experimental y numéricamente.



8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Administration, U.S.E.I. International Energy Outlook 2019. **2019**.
- [2]. Mohammadi, S.; Hassanalian, M.; Arionfard, H.; Bakhtiyarov, S. Optimal design of hydrokinetic turbine for low-speed water flow in Golden Gate Strait Optimal design of hydrokinetic turbine for low-speed water flow in Golden Gate Strait. *Renew. Energy* **2020**, *150*, 147–155.
- [3]. Kim Young-Jak Hanmal nationalism yonku (Studies of Nationalism in the Late Traditional Korea). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **1988**, *16*, 179–187.
- [4]. Sornes, K. Small-scale Water Current Turbines for River Applications. *Zero Emiss. Resour. Organ.* **2010**, 1–19.
- [5]. Laws, N.D.; Epps, B.P. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *57*, 1245–1259.
- [6]. Mosbahi, M.; Ayadi, A.; Chouaibi, Y.; Driss, Z.; Tucciarelli, T. Performance improvement of a novel combined water turbine. *Energy Convers. Manag.* **2020**, *205*, 112473.
- [7]. Kolekar, N.; Banerjee, A. Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. *Appl. Energy* **2015**, *148*, 121–133.
- [8]. Li, Y.; Lence, B.J.; Calisal, S.M. An integrated model for estimating energy cost of a tidal current turbine farm. *Energy Convers. Manag.* **2011**, *52*, 1677–1687.
- [9]. Santos, I.F.S. dos; Camacho, R.G.R.; Tiago Filho, G.L.; Botan, A.C.B.; Vinent, B.A. Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data. *Renew. Energy* **2019**, *143*, 648–662.
- [10]. Alvarez, E.A.; Manso, A.N.; Gutiérrez-Trashorras, A.J.; Francos, J.F.; Secades, M.R. Obtaining renewable energy from tidal currents in the Aviles port: New services for citizens. *Conf. Exhib. - 2013 Int. Conf. New Concepts Smart Cities Foster. Public Priv. Alliances, SmartMILE 2013* **2013**.
- [11]. Blanco-marigorta, E.; Gharib-yosry, A. Evaluación de una turbina hidrocínética de eje vertical para su uso en canales. **2021**, *96*, 1–6.
- [12]. Álvarez-Álvarez, E.; Rico-Secades, M.; Fernández-Jiménez, A.; Espina-Valdés, R.; Corominas, E.L.; Calleja-Rodríguez, A.J. Hydrodynamic water tunnel for characterization of hydrokinetic microturbines designs. *Clean Technol. Environ. Policy* **2020**, *22*, 1843–1854.
- [13]. Académico, M.; Pretende, Y.P.; Rigurosa, D.E.U.N. a F.; Un, E.; En, P.; Realidad, L. a; Mogollón, H. Programa De Doctorado. **2008**.
- [14]. Fern, A. Aprovechamiento energético de corrientes de agua de baja velocidad con turbinas hidrocínéticas de eje vertical en condiciones de bloqueo Aitor Fernández Jiménez.
- [15]. Gharib Yosry, A.; Fernández-Jiménez, A.; Álvarez-Álvarez, E.; Blanco Marigorta, E.



- Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low velocity scenarios. *Energy Convers. Manag.* **2021**, 237.
- [16]. Thesis, M.A.S.T.E.R.O.F.S. 1 The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines. **2006**.
- [17]. Tapia, J. Las ecuaciones de Navier-Stokes I Las ecuaciones de Navier-Stokes I Diego C´.
- [18]. Khawaja, H.; Moatamedi, M. Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) – solution in MATLAB ®. **2018**, 12, 313–326.
- [19]. Profile, S.E.E.; Profile, S.E.E. RATING TURBULENCE MODELS IN COMPUTATIONAL DOMAINS FOR VALORACIÓN DE MODELOS DE TURBULENCIA EN DOMINIOS. **2016**.
- [20]. Gorle, J.M.R.; Chatellier, L.; Pons, F.; Ba, M. Flow and performance analysis of H-Darrieus hydroturbine in a confined flow: A computational and experimental study. *J. Fluids Struct.* **2016**, 66, 382–402.
- [21]. Hyman, J.M. NUMERICAL METHODS FOR TRACKING INTERFACES* James M. HYMAN. **1984**, 396–407.
- [22]. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries *. **1981**, 225, 201–225.
- [23]. Andersson, B.; Andersson, R.; Håkansson, L.; Mortensen, M.; Sudiyo, R.; Van Wachem, B. *Computational fluid dynamics for engineers*; 2011; Vol. 9781107018; ISBN 9781139093590.