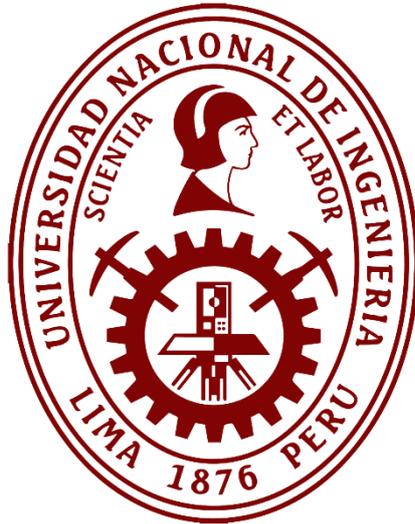


**Universidad Nacional de Ingeniería**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**UNIDAD DE POSGRADO**



**TESIS:**

OPTIMIZACIÓN DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA DE RÍOS DE  
BAJO CAUDAL PARA GARANTIZAR EL MEJOR COEFICIENTE DE  
POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

**ELABORADO POR:**

TANIA MERCEDES CASTAÑEDA GRISPO

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON  
MENCIÓN EN ENERGÉTICA

**ASESOR:**

DSC. JUAN JOSÉ UCHUYA LÓPEZ

**LIMA, PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

*Dedicado a mis hijas por el afecto y ánimo en todo momento para mi formación como maestro en ciencias y de mi amado esposo, que sin su amor y apoyo no lo hubiera logrado.*

***Tania Castañeda***

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a mi asesor, el DSc. Ing. Juan José Uchuya López, por su amistad y orientación en el desarrollo y culminación de mi tesis.*

*A los profesores y autoridades de la Universidad Nacional de Ingeniería, a CARELEC por el maravilloso programa de maestría desde que ingresé y a la Biblioteca Central UNI por facilitar un ordenador especializado con la licencia académica del Fluent del Ansys Academic para la simulación numérica.*

*A los amigos, colegas, compañeros de aulas y de trabajo de los cuales he aprendido a ser mejor persona y profesional.*

*A mis padres, hermanos, familiares por ser parte y apoyo fundamental de mi vida.*

*Y a Dios, por todo.*

*“La electricidad es el alma del universo”*

***John Wesley***

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo el optimizar una Turbina Hidrocinética utilizada para extraer energía generada por las corrientes de ríos de bajo caudal. La importancia de este estudio es evaluar el rendimiento y el campo de flujo en la turbina utilizando simulación numérica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El estudio aborda de manera general y específica los trabajos realizados en la materia de energía hidrocinética, a su vez, hace una revisión de los modelos matemáticos validados en aplicaciones industriales. El alcance del trabajo es optimizar el coeficiente de potencia, dado por la relación de la potencia eléctrica obtenida por la potencia cinética del flujo de agua, como indicador de la eficiencia de una Turbina Hidrocinética con dos tipos de perfil hidrodinámico, NACA 8610 y NACA 8620; para ello, se analiza el comportamiento del flujo que representa a la corriente del río a través de la Turbina Hidrocinética, y se evalúan los perfiles hidrodinámicos de sus palas y su influencia por la velocidad angular y el coeficiente de potencia para una mejor conversión de energía cinética.

Palabras Clave: Turbina Hidrocinética, simulación numérica, perfil hidrodinámico, velocidad angular y coeficiente de potencia.

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is to optimize a hydrokinetic turbine used to extract energy generated by the currents of low-flow rivers. The importance of this study is to evaluate the performance and the flow field in the turbine using numerical simulation of Computational Fluid Dynamics (CFD). The study addresses in a general and specific way the work carried out in the field of hydrokinetic energy, in turn, makes a review of the mathematical models validated in industrial applications. The scope of the work is to optimize the power coefficient, given by the ratio of the electrical power obtained by the kinetic power of the water flow, as an indicator of the efficiency of a hydrokinetic turbine with two types of hydrodynamic profile, NACA 8610 and NACA 8620; For this, the behavior of the flow that represents the current of the river through the hydrokinetic turbine is analyzed, and the hydrodynamic profiles of its blades and their influence by the angular velocity and the power coefficient for a greater conversion of kinetic energy are evaluated.

Keywords: Hydrokinetic turbine, numerical simulation, hydrodynamic blades, angular velocity and power coefficient.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS.....	3
1.1 Antecedentes de la investigación .....	3
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio .....	15
1.3 Formulación del problema .....	20
1.3.1 Problema General.....	20
1.3.2 Problemas Específicos .....	20
1.4 Justificación e importancia.....	20
1.5 Objetivos .....	21
1.5.1 Objetivo General.....	21
1.5.2 Objetivo Específico .....	21
1.6 Hipótesis .....	21
1.6.1 Hipótesis General .....	21
1.6.2 Hipótesis Específico.....	22
1.7 Variables, dimensiones e indicadores.....	22
1.8 Unidad de análisis .....	24
1.9 Fuentes de información .....	24
1.10 Tipo y nivel de investigación.....	24
1.10.1 Tipo de investigación .....	24
1.10.2 Nivel de investigación .....	25
1.11 Método de diseño de la investigación.....	25
1.12 Población y muestra.....	26
1.12.1 Población.....	26
1.12.2 Muestra .....	26

1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	26
1.14 Análisis y procesamiento de datos .....	26
CAPÍTULO II.....	28
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	28
2.1 Fuentes de energía .....	28
2.1.1 Fuentes convencionales .....	28
2.1.2 Fuentes no convencionales .....	31
2.2 Ríos .....	34
2.2.1 Según su carácter.....	34
2.2.2 Según su condición de estabilidad.....	35
2.2.3 Según su ubicación topográfica .....	35
2.3 Turbinas Hidrocinéticas .....	36
2.3.1 Turbinas horizontales.....	36
2.3.2 Turbinas verticales.....	36
2.4 Modelos de turbulencia .....	38
2.4.1 Modelo K- $\epsilon$ .....	38
2.4.2 Modelo K- $\omega$ .....	39
2.4.3 Modelo SST .....	39
2.5 Método de volúmenes finitos (mvf) .....	39
2.5.1 Enmallado de la geometría .....	40
2.6 Coeficiente de potencia .....	41
2.7 Relación velocidad-punta .....	42
2.8 Fuerzas de sustentación y arrastre.....	42
2.9 Marco conceptual .....	43
2.9.1 Ríos de bajo caudal .....	43
2.9.2 Turbina Hidrocinética .....	43
2.9.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD) .....	44
CAPÍTULO III.....	45

DESARROLLO DE LA TESIS .....	45
3.1 Geometría de Turbina Hidrocinética .....	45
3.1.1 Elementos principales .....	45
3.1.2 Dimensiones principales .....	48
3.2 Parámetros de análisis .....	48
3.2.1 Velocidad angular ( $\omega$ ) .....	48
3.2.2 Perfil NACA.....	49
3.3 Simulación por CFD .....	50
3.3.1 Geometría y dominio.....	50
3.3.2 Enmallado.....	51
3.3.3 Condiciones de contorno .....	52
CAPÍTULO IV .....	54
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS .....	54
4.1 Resultados de Turbina Hidrocinética con perfil NACA 8610 .....	54
4.2 Resultados de Turbina Hidrocinética con perfil NACA 8620.....	60
4.3 Serie temporal del momento del eje vertical .....	65
4.3.1 Series con turbina con perfil NACA 8610.....	65
4.3.2 Series con turbina con perfil NACA 8620 .....	67
4.3.3 Coeficiente de potencia .....	69
4.4 Discusión de resultados .....	72
4.5 Contrastación de hipótesis .....	73
4.6 Aporte .....	75
CONCLUSIONES .....	77
RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS .....	80
ANEXO A.....	1
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	1

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Construcción típica de un generador lineal tubular.....	4
Figura 2 Velocidad del fluido.....	5
Figura 3 Presión sobre el contorno del perfil.....	7
Figura 4 Proceso de diseño típico del método de CFD .....	9
Figura 5 Visualización del flujo de turbina de cuatro álabes.....	10
Figura 6 Turbinas de tamaño real instalados en Bariri-SP .....	10
Figura 7 Líneas de flujo del escenario con 3 discos desplazados .....	12
Figura 8 Formas geométricas en 3D de álabes hidrocinéticos diseñados, usando los modelos de: (a) Glauert; (b) Silva; (c) Vaz y Wood; (d) Trabajo presente. ....	13
Figura 9 Dibujo 3D de los rotores LucidPipe (A) y esférico-helicoidal (B).....	15
Figura 10 Central termoeléctrica.....	28
Figura 11 Central de embalse.....	29
Figura 12 Central hidroeléctrica de pasada.....	30
Figura 13 Central de bombeo .....	30
Figura 14 Central solar termoeléctrica .....	31
Figura 15 Central fotovoltaica .....	32
Figura 16 Central geotérmica.....	32
Figura 17 Central mareomotriz .....	33
Figura 18 Central eólica.....	34
Figura 19 Ejemplo de turbina horizontal.....	36
Figura 20 Diseño típico de una turbina Darrieus. ....	37
Figura 21 Diseño típico de una turbina Savonius.....	37
Figura 22 Malla típica.....	40
Figura 23 Capas cercanas a la pared .....	41
Figura 24 Fuerza de sustentación y arrastre.....	42

Figura 25 Caudal promedio mensual, barras verdes en escala distinta .....	43
Figura 26 Palas de la Turbina Hidrocinética, en rojo.....	46
Figura 27 Soportes de la Turbina Hidrocinética, en rojo.....	47
Figura 28 Eje de la Turbina Hidrocinética, en rojo.....	47
Figura 29 Dimensiones principales de la Turbina Hidrocinética. ....	48
Figura 30 Turbina Hidrocinética 8610 .....	49
Figura 31 Turbina Hidrocinética 8620 .....	50
Figura 32 Geometría deTurbina Hidrocinética con NACA 8610 a 20 RPM.....	51
Figura 33 Geometría deTurbina Hidrocinética con NACA 8620 a 20 RPM.....	51
Figura 34 Enmallado deTurbina Hidrocinética con NACA 8610 .....	52
Figura 35 Enmallado deTurbina Hidrocinética con NACA 8620 .....	52
Figura 36 Condiciones de contorno para Turbina Hidrocinética .....	53
Figura 37 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 20 RPM. ....	54
Figura 38 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 30 RPM. ....	55
Figura 39 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 40 RPM. ....	55
Figura 40 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 50 RPM. ....	55
Figura 41 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 60 RPM. ....	56
Figura 42 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 70 RPM. ....	56
Figura 43 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 80 RPM. ....	56
Figura 44 Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 90 RPM. ....	57
Figura 45 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 20 RPM. ....	57
Figura 46 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 30 RPM. ....	57
Figura 47 Campo de presiones turbina con NACA 8610 a 40 RPM. ....	58
Figura 48 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 50 RPM. ....	58
Figura 49 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 60 RPM. ....	58
Figura 50 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 70 RPM. ....	59
Figura 51 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 80 RPM. ....	59
Figura 52 Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 90 RPM. ....	59

Figura 53 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 20 RPM.....	60
Figura 54 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 30 RPM.....	60
Figura 55 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 40 RPM.....	61
Figura 56 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 50 RPM.....	61
Figura 57 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 60 RPM.....	61
Figura 58 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 70 RPM.....	62
Figura 59 Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 80 RPM.....	62
Figura 60 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 20 RPM. ....	62
Figura 61 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 30 RPM. ....	63
Figura 62 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 40 RPM. ....	63
Figura 63 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 50 RPM. ....	63
Figura 64 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 60 RPM. ....	64
Figura 65 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 70 RPM. ....	64
Figura 66 Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 80 RPM. ....	64
Figura 67 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 20 RPM.....	65
Figura 68 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 30 RPM.....	65
Figura 69 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 40 RPM.....	65
Figura 70 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 50 RPM.....	66
Figura 71 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 60 RPM.....	66
Figura 72 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 70 RPM.....	66
Figura 73 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 80 RPM.....	66
Figura 74 Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 90 RPM.....	67
Figura 75 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 20 RPM.....	67
Figura 76 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 30 RPM.....	67
Figura 77 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 40 RPM.....	68
Figura 78 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 50 RPM.....	68
Figura 79 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 60 RPM.....	68
Figura 80 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 70 RPM.....	68

Figura 81 Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 80 RPM.....	69
Figura 82 Momento promedio vs RPM de Turbina Hidrocinética. ....	69
Figura 83 Coeficiente de potencia vs relación velocidad punta. ....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Potencial energético de cuencas y ríos de la selva central.....	16
Tabla 2 Operacionalización de variables.....	23
Tabla 3 Dimensiones principales .....	48
Tabla 4 Velocidades de operación .....	49
Tabla 5 Perfiles Naca.....	49
Tabla 6 Tamaños de malla.....	51
Tabla 7 Condiciones de contorno .....	52
Tabla 8 Intervalo de valores temporales y momento promedio .....	70
Tabla 9 Propiedades de flujo .....	71
Tabla 10 Coeficientes de potencia de Turbina Hidrocinética 8610.....	71
Tabla 11 Coeficientes de potencia de Turbina Hidrocinética 8620.....	72
Tabla A.1 Matriz de consistencia .....	2

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como objetivo la optimización de una turbina hidrocínética de eje vertical para ríos de bajo caudal, abordando desde las consideraciones de diseño hasta el análisis detallado del comportamiento hidrodinámico del flujo de agua a través de la turbina, utilizando simulaciones numéricas basadas en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Para ello, se empleará el software ANSYS Academic 2022 con su módulo Fluent, el cual cuenta con licencia proporcionada por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y se encuentra disponible en las instalaciones de la biblioteca central.

Este trabajo busca mejorar la eficiencia de la turbina a través del análisis del coeficiente de potencia, el cual se define como la relación entre la potencia eléctrica generada y la potencia cinética del flujo de agua. Se evaluarán dos perfiles hidrodinámicos, NACA 8610 y NACA 8620, analizando su rendimiento bajo distintas velocidades angulares y su influencia en la conversión de energía cinética a eléctrica.

La estructura de la tesis está dividida en cuatro capítulos principales, seguidos de conclusiones y recomendaciones, descritos de la siguiente manera:

- El **Capítulo 1**, titulado "Aspectos generales y metodológicos", aborda la revisión bibliográfica de estudios previos relacionados con el tema, destacando investigaciones y tesis de posgrado relevantes. Este capítulo también incluye la descripción del problema de investigación, la formulación de los objetivos, las hipótesis, variables e indicadores, y la metodología que guiará el análisis y discusión de resultados.
- El **Capítulo 2**, denominado "Marco Teórico y Conceptual", expone los fundamentos teóricos necesarios para entender el contexto del estudio. Entre los conceptos clave

se incluyen las fuentes de energía convencional y no convencional, las características de los ríos, el funcionamiento de las turbinas hidrocinéticas, los modelos de turbulencia, el método de volúmenes finitos, el coeficiente de potencia y la fuerza de sustentación y arrastre, culminando con una explicación detallada sobre el uso del CFD.

- El **Capítulo 3**, titulado "Desarrollo de la Tesis", se enfoca en la obtención de datos de entrada y la aplicación de los procedimientos numéricos basados en el método de volúmenes finitos y la simulación CFD, con el objetivo de optimizar el rendimiento de la turbina hidrocinética.
- El **Capítulo 4**, "Análisis de resultados y contrastación de hipótesis", incluye la evaluación de los perfiles NACA 8610 y NACA 8620 bajo diferentes condiciones de operación, particularmente en relación con las velocidades angulares y su efecto sobre el coeficiente de potencia. Se discute el impacto de los perfiles aerodinámicos, originalmente diseñados por la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), en aplicaciones hidrodinámicas, donde la fuerza de sustentación se convierte en empuje hidrodinámico.

Finalmente, las **Conclusiones** recogen los resultados obtenidos en el capítulo anterior, contrastando las hipótesis planteadas inicialmente. Las **Recomendaciones** ofrecen posibles vías de mejora o aplicaciones futuras derivadas del trabajo realizado, y las **Referencias** citan las fuentes utilizadas a lo largo del estudio.

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS

En este capítulo se presenta una revisión de artículos indexados y tesis de posgrado para establecer los antecedentes referenciales, asimismo, se presenta el problema de la tesis y se establece los objetivos, las hipótesis y la metodología de investigación resumida en la matriz de consistencia en Anexo A.1, y desarrolladas en las siguientes secciones.

### 1.1 Antecedentes de la investigación

**Saini & Saini (2021)** buscan explorar el rendimiento y el campo de flujo para un rotor híbrido bajo diferentes condiciones de operación. El concepto de diseño consiste en combinar un rotor Savonius y uno de tipo Darrieus.

La metodología se basa en construir un modelo numérico para el cual se consideran 2 palas semicirculares para la componente de Savonius y tres perfiles NACA 0018 para la componente Darrieus. Se busca diseñar el rotor para una velocidad de flujo de 1.5 metros por segundo. El diseño del modelo fue llevado a cabo en el programa ANSYS 18.1 en el módulo FLUENT, se empleó el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ , modelo utilizado para condiciones de flujo de corriente libre, utilizado en simulación como un flujo circulante.

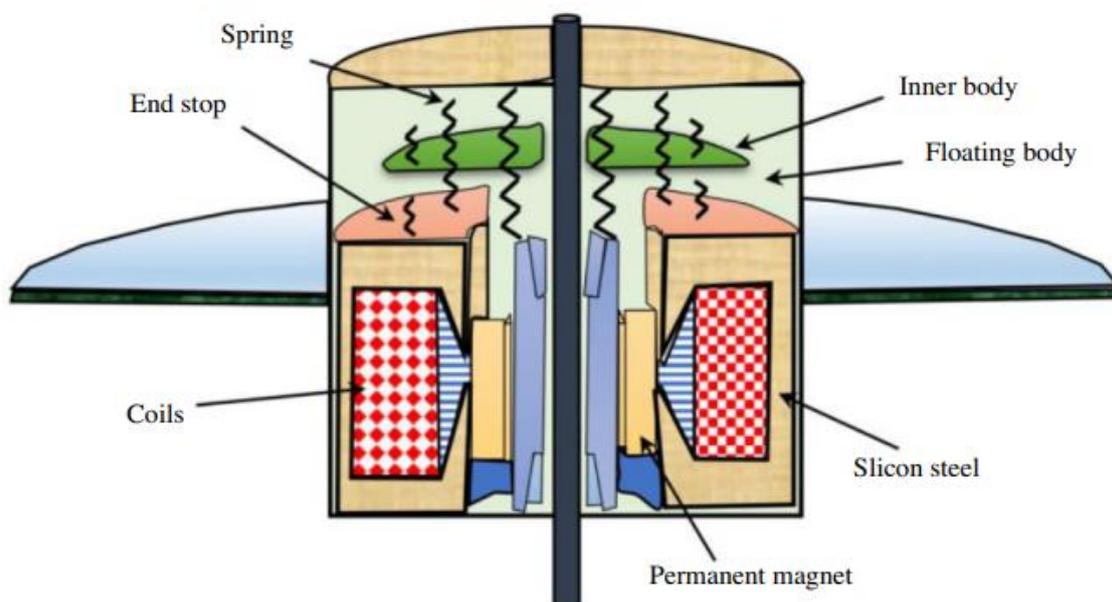
Los autores concluyeron que se obtuvo un coeficiente de potencia máximo de 0.29 para una relación de velocidad de la punta del perfil o pala respecto del flujo de agua de 1.6, siendo que la velocidad de la punta (en inglés Tip Speed Ratio – TSR) varíe entre 0.8 a 2.0 y tiene la característica que mientras más lejos del centro, más rápido giran las aspas. El torque resultante está compuesto de dos componentes de fuerzas, la fuerza de

sustentación y la fuerza de arrastre, ambas respecto al radio de giro. Se determinó que el incremento en la velocidad angular del rotor reduce el coeficiente de potencia ya que el rotor Savonius retrasa la rotación a elevadas velocidades perimetrales.

Ali, M. S., Tuhin, R. A., Khan, M. S. H., & Hasanuzzaman, M. (2021) manifiesta que la tecnología de extracción de energía de olas mar adentro es prometedora en contraste a otras fuentes de energía limpias y sostenibles.

### Figura 1

Construcción típica de un generador lineal tubular



Nota: fuente Ali et al. (2021)

Los autores evalúan la construcción de varios tipos de generadores eléctricos lineales montados en boyas flotantes tal y como se muestra en la Figura 1, además presentan un resumen de las técnicas de optimización relacionadas a la extracción de energía de las olas. Los autores encontraron que la eficiencia operacional es mucho más dependiente del diseño de los generadores lineales, así como de las boyas.

Los autores concluyeron que la implementación de materiales magnéticos avanzados en generadores lineales, como es el caso en el imán permanente N52 con un núcleo Supermendur que genera la mayor cantidad de energía eléctrica que cualquier otra combinación, reduce la pérdida en los núcleos por su mejor propiedad de saturación magnética pero son a menudo costosos, adicionalmente a ello, con sistemas de

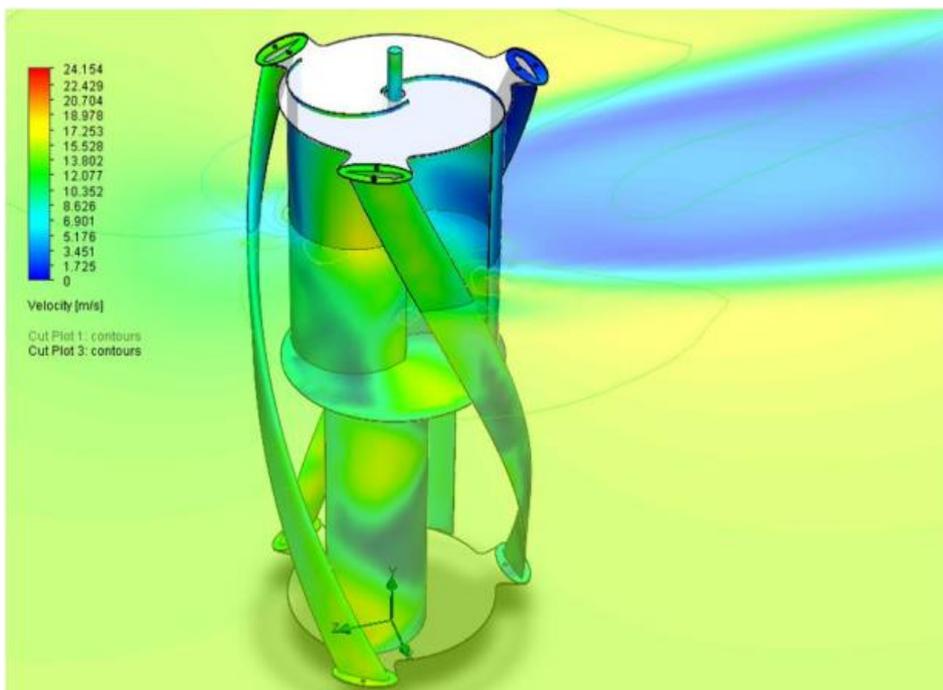
enfriamiento y arreglos complejos en los sistemas de retroalimentación, reducen la producción neta de la electricidad, por lo que se descarta un diseño óptimo uniforme sino que cada escenario debe contar con su estudio que contemple los materiales empleados, arreglo y la viabilidad en costos.

**Núñez-Quispe, J. J., Núñez-Quispe, A. A., & Cedamano-Cuenca, R. O. (2020, September)** tienen como objetivo caracterizar el comportamiento de una turbina de viento híbrida Darreius-Savonius en diferentes condiciones de flujo.

La metodología empleada fue realizar un análisis numérico mediante CFD en el software ANSYS FLUENT tomando como velocidad del fluido 9 metros por segundo, este valor fue obtenido de promedios anuales en la región Cajamarca en zonas alejadas de la red eléctrica. En la que se analizaron velocidades de rotación entre 10 a 40 radianes por segundo (equivalente aproximadamente entre 95.5 a 382 RPM). Se estableció un dominio de interacción entre la turbina y el flujo de aire, descompuesto en un dominio rotativo para la turbina y un dominio para el flujo constante del aire, la respuesta del flujo de aire se observa en la Figura 2.

**Figura 2**

*Velocidad del fluido*



*Nota:* fuente Núñez et al. (2020)

Los autores concluyeron que este tipo de turbina es viable en zonas donde no haya acceso a la red eléctrica y donde haya recursos eólicos suficientes. Los resultados obtenidos les permitieron determinar zonas de la turbina que tienen un comportamiento poco eficiente con esto se mejora el modelo. Finalmente se determinó que la potencia máxima obtenida en régimen estable es de 252W.

**Guner, F., & Zenk, H. (2020)** diseñan una Turbina Hidrocinética para regiones de elevada altitud en las cuales el acceso a las redes eléctricas es difícil para obtener energía sustentable y ecológica que cumpla con el incremento en la demanda energética.

El estudio consiste en una investigación experimental, así como de un análisis numérico de una Turbina Hidrocinética con palas de rotación fija. El análisis numérico fue realizado mediante el software MATLAB R2014 aplicando CFD, también se investigó la eficiencia del sistema tomando en cuenta la instalación y los costos de inversión necesarios para un río con un caudal de 30 metros cúbicos por hora (equivalente a 0.277 litros por segundo), haciendo una comparación con un costo promedio de energía en Turquía de 18 centavos de dólar americano por kilowatt hora.

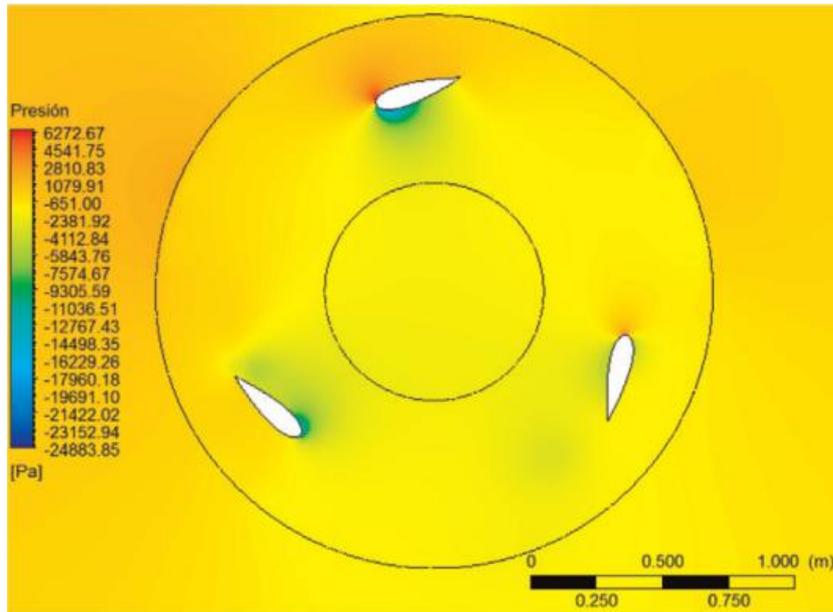
Los autores concluyeron que la conversión de energía con turbinas hidrocinéticas compite con la de origen solar en términos de costo, estabilidad de carga y frecuencia eléctrica. La eficiencia de la Turbina Hidrocinética, evaluada por el coeficiente de potencia, se realiza para una turbina con palas de rotación fija que alcanza el valor de 0.4 para el caso estudiado por los autores. Un sistema implementado que otorgue una potencia de 250W cumplirá la demanda de un hogar en una aldea. Finalmente se concluyó que el costo de inversión será recuperado en un lapso de 11 a 15 años, y aunque el tiempo de retorno parece lejano, se tiene en cuenta que el sistema propuesto sea utilizado en zonas remotas, de elevada altitud, por ende, con riesgos asociados en costos.

**Arrieta, E. L. C., & Clemente, A. R. (2019)** plantean que las comunidades rurales alejadas de las redes eléctricas tienen como alternativa el uso de turbinas hidro cinéticas para la generación de electricidad.

Los autores analizaron diferentes parámetros de diseño de turbinas hidro cinéticas verticales, luego determinaron la configuración óptima para un determinado juego de parámetros mediante un análisis basado en CFD.

**Figura 3**

*Presión sobre el contorno del perfil*



*Nota:* fuente Arrieta et al. (2019)

Concluyeron que el modelo de turbulencia adecuado es el de transporte de esfuerzo cortante  $k-\omega$ , también encontraron que durante la revolución de la turbina el coeficiente de potencia sufre variaciones de gran amplitud y rapidez, se observa en la Figura 3 que las palas están sometidas cargas desbalanceadas. Finalmente se obtuvo un coeficiente de potencia de 62% para una relación de velocidad de la punta del perfil o pala respecto del flujo de agua (llamada en inglés Tip Speed Ratio – TSR) de 1.75, este valor es inferior a la potencia que se podría obtener de una turbina axial, sin embargo, la construcción e implementación de turbinas verticales es mucho más sencilla y económica.

**Wu, Y. K., Tsai, C. Z., & Li, Y. H. (2018, abril)** tienen como objetivo identificar las principales ventajas y puntos débiles de las turbinas de viento que están acopladas a diferentes tipos de generadores tales como generadores de imán permanente síncronos, generador por reluctancia, generadores por superconducción en alta temperatura entre otros.

Los autores compararon las principales características de diseño de los distintos tipos de generadores, también incluyeron varios parámetros como la eficiencia del sistema, el par o torque de retención (torque máximo que soporta un motor), el comportamiento ondulatorio del par, el tamaño y peso, así como el tipo de material magnético empleado en las maquinas.

Los autores concluyen que, entre los posibles materiales magnéticos para turbinas de viento como la ferrita, aleaciones de aluminio-níquel y cobre, tierras raras y magnetos permanentes, este último juega un rol importante ya que al no necesitar una fuente de poder son menos espaciosos y más ligeros que los demás.

**Chen, J., Yang, H., Yang, M., Xu, H., & Hu, Z. (2015)** investigaron no solo la influencia del diseño de una turbina de viento tipo Darrieus sobre el coeficiente de potencia ( $C_P$ ), sino también el efecto sobre la estabilidad de arranque. Realizaron una revisión sobre un amplio rango de diseños de perfiles aerodinámicos, discutieron la aplicabilidad de los procesos de diseño basados en tópicos de investigación, especialmente aquellos basados en los métodos de 1) Momento, vórtice y cascada, que calculan fuerzas aerodinámicas sobre un cuerpo de momentos generados por las presiones en la superficie y el modelamiento del flujo alrededor de un cuerpo mediante la distribución de vórtices y los efectos de cascadas que simulan la interacción vórtices y superficie; 2) Método de panel, que divide la superficie del cuerpo en paneles para resolver ecuaciones de sustentación o inducción para calcular las presiones y fuerzas aerodinámicas y 3) Método de CFD, que modela el flujo de fluido alrededor resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes.

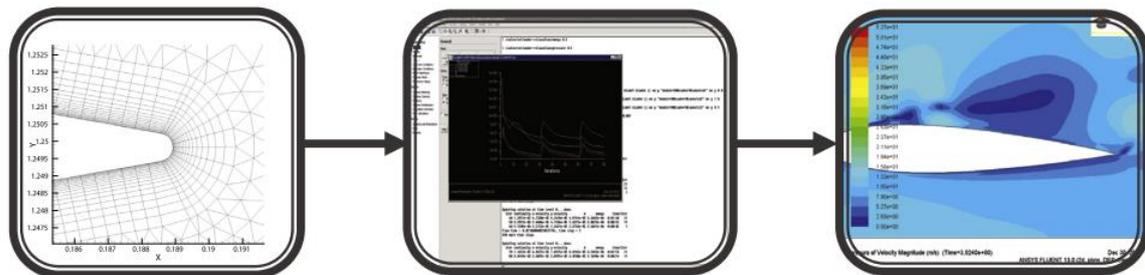
La metodología que emplearon consiste en resumir los procesos principales en los distintos métodos analizados para lo cual se emplearon diagramas de flujo y comparación entre los resultados esperados en cada método.

Los autores concluyeron que en el caso de los métodos basados en el momento del rotor (calculadas por las fuerzas locales normales y tangenciales), vórtice (causada por el campo de flujo o circulación de vórtices por movimiento periódico de las aspas) y cascada (similar a lo usado en turbomáquinas, es un modelo que evita problemas en

convergencia encontrados en la teoría de la velocidad de punta altas) que son de tipo cuasi estático son más robustas que las simulaciones basadas en panel o por CFD, siempre y cuando se conozcan las características de confiabilidad y de construcción de los perfiles aerodinámicos. También concluyen que el método del panel consume más recursos computacionales que los métodos basados en momentum, pero a su vez es más simple y preciso que los métodos basados en vórtice y en CFD. Finalmente, los autores postulan que el método basado en CFD, esquematizado en la Figura 4, es actualmente uno de los acercamientos más populares a pesar de su alto coste computacional debido a que predice el coeficiente de potencia, así como información detallada del flujo del fluido.

#### Figura 4

*Proceso de diseño típico del método de CFD*



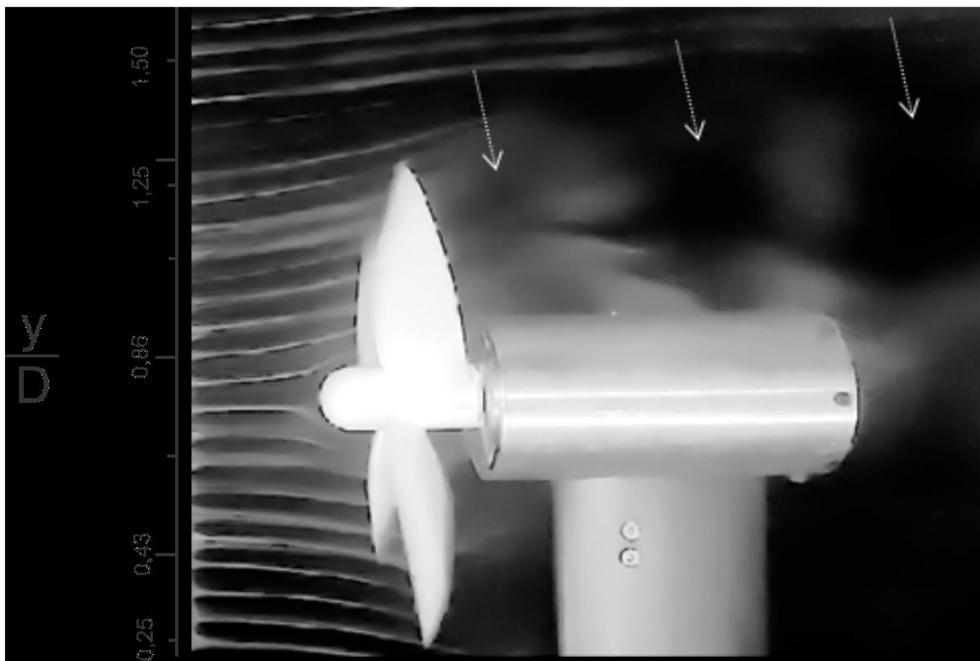
Nota: fuente Chen et al. (2015)

**Moura (2018)**, en su tesis de maestría, realizó una investigación de tipo experimental en que analiza los flujos de Turbinas Hidrocinéticas de eje horizontal por no ser limitados por caídas de agua. Su trabajo consistió de hacer un prototipo a escala de una turbina con un diámetro de 230 mm, y se probaron tipos de álabes para rotores de dos, tres hasta cuatro álabes con variación de la velocidad angular para estudiar el comportamiento del flujo. El experimento se realizó en un túnel de viento a una velocidad de flujo de 5 m/s y Reynolds  $Re= 7,9 \times 10^4$ . Este túnel consta de un generador de humo y se practicaron ensayos de visualización de humo (1. Hilo de humo; 2. Inyección directa por generador de humo) y, a través de imágenes obtenidas, ver ejemplo en Figura 5, se concluyó que aplicando los dos métodos de visualización para los prototipos de turbinas, los vórtices son apreciables y definidos y están directamente relacionados al desempeño de la turbina. El método de hilo de humo se presentó con resultados satisfactorios pues es

menos laminar que lo presentado con el generador de humo y se obtiene un buen costo-beneficio respecto a los fotogramas por segundo y la velocidad de obturación. Lo que se rescata de la tesis es la realización experimental de una Turbina Hidrocinética para evaluar su instalación, ver Figura 6, aunque lo indicado debía haber sido su prueba con fluido líquido, el principio es el mismo, siempre que se verifique resultados laminares. Existen tanques de aguas recirculantes que son apropiadas para un ensaño de este tipo en que no se usaría el rotor, sino que el flujo del agua recirculante generaría una respuesta en los álabes.

### Figura 5

*Visualización del flujo de turbina de cuatro álabes*



Nota: fuente Moura (2018)

### Figura 6

*Turbinas de tamaño real instalados en Bariri-SP*



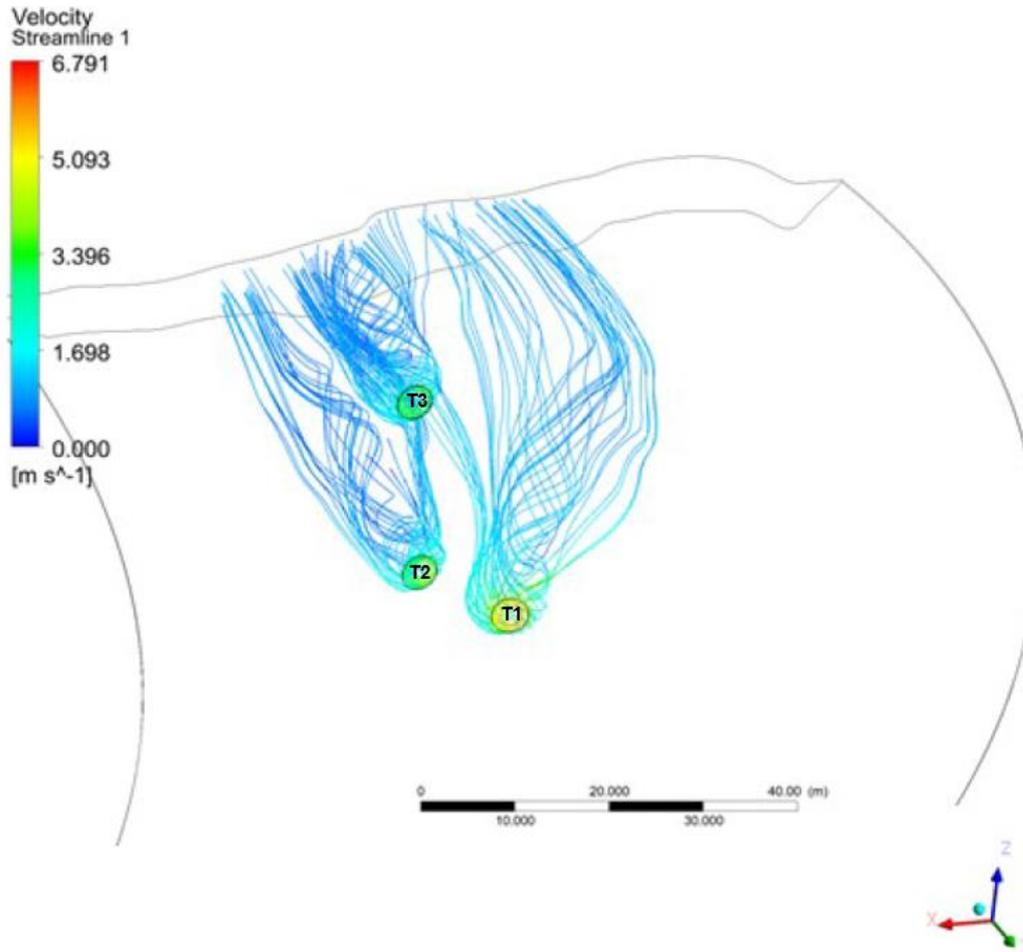
Nota: fuente Moura (2018)

**Santos (2019)**, en su tesis de doctorado, emplea el análisis por simulación numérica del potencial hidrocínético de dos ríos al norte de Brasil. El Ansys CFX y Fluent es de gran consumo computacional, debido a que se trabaja con elementos finitos y es conocido que los fluidos son los más complejos de simular, sin embargo, los softwares mencionados, acompañados con potentes ordenadores, realizan el trabajo de viabilizar el diseño, disposición y eficiencia de generación de energía en la instalación de una Turbina Hidrocínética. El autor realizó una batimetría para evaluar el lugar adecuado para la instalación de un parque de Turbinas Hidrocínéticas, se estudiaron las velocidades y caudales. Luego, se definió el número de turbinas, potencial disponible, resultando de 109,5 y 31,5 kW, respectivamente para los ríos Jamari y Curuá-UNa. Si bien el estudio evalúa la viabilidad económica de los parques hidrocínéticos, lo rescatable es la utilización de simulación numérica para posicionar de forma eficiente las turbinas en configuración y en la condición de no superponer los efectos de las estelas. El estudio representó zonas del río donde las corrientes son caracterizadas respecto a la batimetría y los correntómetros usados. En el contraste de los resultados de la simulación con la experimental, se obtuvo un desvío menor al 13% de las velocidades medias resultantes, con lo que concluyeron que la simulación podría apoyar en el planeamiento del parque hidrocínético y en las configuraciones de las turbinas. Por último, la distancia de la estela está en función del funcionamiento de la turbina, quiere decir, que en los puntos en que los álabes presentan mejor rendimiento se extrae más energía, y se prueba por la menor energía disipada, observable por el comportamiento de los vórtices, evitando la superposición de estelas, como se observa en la Figura 7, la posición que eligió el autor de las tres turbinas (conformando un parque hidrocínético) es adecuada y se aprecia que T3, a aguas abajo a 35 m de T1, tiene un promedio de velocidad de corriente de 1.2 m/s, pero la dificultad que se encuentra es en la velocidad variable, decrecía en la medida que avanzaba el río y se ensanchaba, sin embargo, para el autor, la condición de tres turbinas es la más conveniente para ser instalada y se demostraba que la generación de energía de T1 era de 13 kW y que las turbinas T2 y T3, aun cuando la T3 está a 35 m de T1, ambas

generaban cada una 4.83 kW según la simulación, por lo que no había un efecto negativo de T1 sobre ambas, y ni la T2 afectaba en la generación de energía de la T3 según la velocidad del río caracterizado.

### Figura 7

*Líneas de flujo del escenario con 3 discos desplazados*



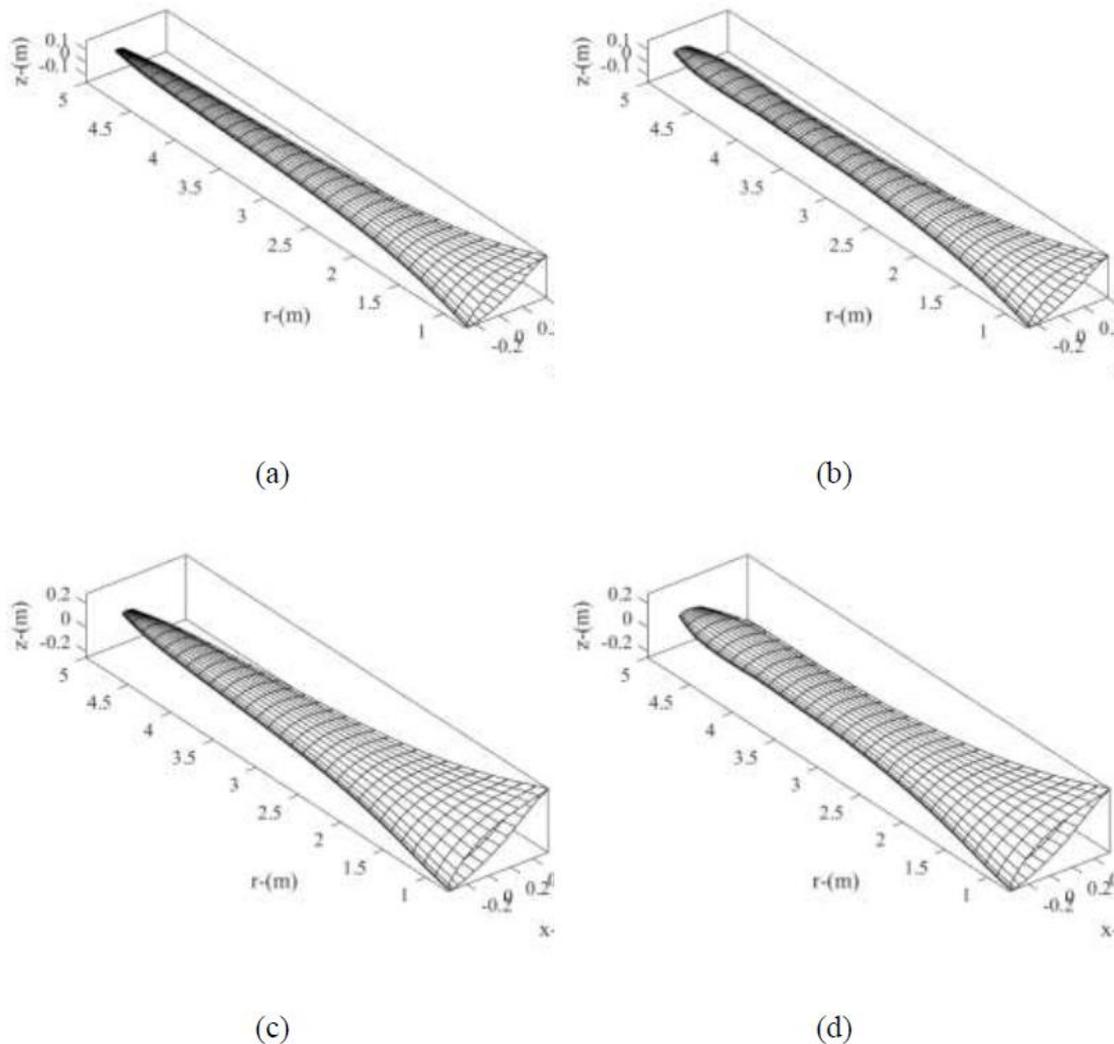
*Nota:* fuente Santos (2019)

**Vaz (2019)**, en su tesis de doctorado, hace una revisión de las matemáticas aplicadas a turbinas de dos tipos, hidrocinéticas y eólicas, y evalúa el coeficiente de potencia generado por la utilización de un difusor, que, al ser contrastado, demuestra que la turbina con difusor duplica el coeficiente de potencia respecto a una turbina común o convencional. El autor justifica su trabajo resolviendo que la teoría de elementos de palas (o álabes), con la que se evalúan las eficiencias de las turbinas, no consideran en su evaluación el efecto de los difusores en los rotores. El modelo matemático desarrollado incluye en las condiciones de diseño el efecto de difusión, así como los factores de

inducción axial, de empuje y de eficiencia en la carga generada a través del coeficiente de potencia. El modelo desarrollado debe evitar la cavitación con el difusor. El aporte de este trabajo es en la extensa revisión literaria sobre el cálculo del coeficiente de potencia, valioso para esta tesis en su desarrollo, en relación a eficiencia, relación de área en el balance de energía. El autor utilizó dos difusores, el de brida cónica y el de brida de lente, y los álabes considerados fueron respecto los modelos de Glauert, Silva, Vaz y Wood, y el propuesto por el autor con difusor (ver Figura 8 para brida cónica).

**Figura 8**

*Formas geométricas en 3D de álabes hidrocineéticos diseñados, usando los modelos de: (a) Glauert; (b) Silva; (c) Vaz y Wood; (d) Trabajo presente.*



*Nota:* fuente Vaz (2019)

Entre los resultados obtenidos con enfoque en la Turbina Hidrocineética, descartando la eólica, la turbina con difusor de bridas cónicas, el caudal másico es

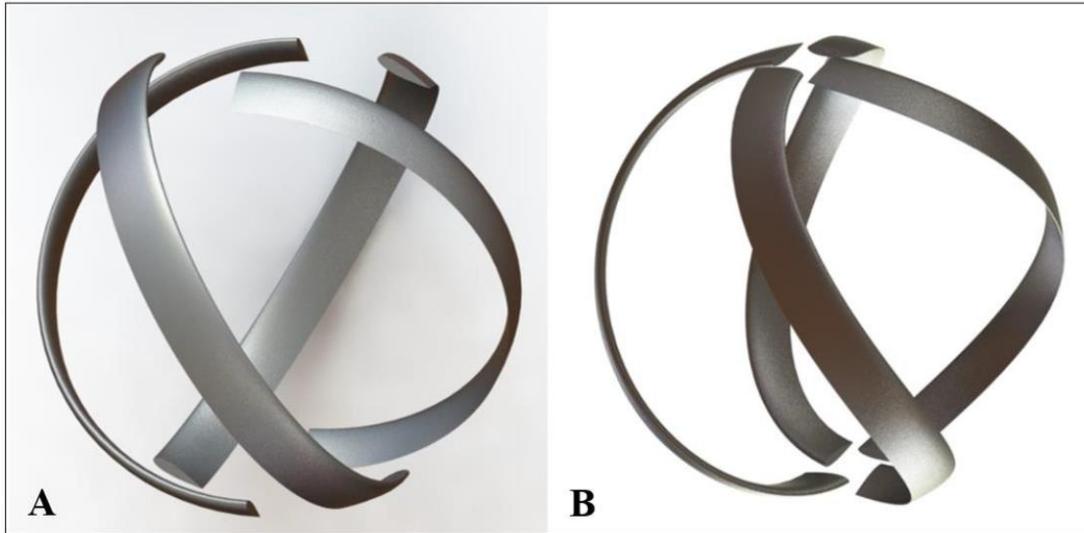
aproximadamente un 20 % más alto que para una turbina de flujo libre (convencional), mientras que, para la turbina con difusor de bridas de lente, el aumento fue solo del 2.4 %. Además, para el difusor con brida cónica, la potencia se incrementó en un 53%, y concluye que el modelo de optimización de cuerdas propuestos con el elemento de álabe propuesto y desarrollado en CFD con concordancia experimental, demostró resultados satisfactorios. La utilización del CFD es menos costoso que los métodos experimentales, es así que calibrar los resultados es indispensable para correcciones en campo, además, la principal contribución es el uso del coeficiente de presión mínimo como criterio para evitar la cavitación en álabes hidrocineéticos optimizados. Como resultado, se demostró una correcta predicción de la cavitación y buen desempeño con el enfoque de incrementar la energía en un 42% para un flujo de 2.5 m/s de una Turbina Hidrocineética sin y con difusor.

**Santos (2019)**, en su tesis de maestría, aplica la dinámica de fluidos computacional, también llamado CFD, para evaluar el desempeño de Turbinas Hidrocineéticas bajo el comportamiento del flujo sobre tres perfiles de características aerodinámicas, NACA 0015, 0018 y 0020, regido por el principio de funcionamiento de las fuerzas de sustentación. El procedimiento es elaborar la geometría de los perfiles en las palas, enmallarlos y caracterizarlos dando propiedades, para luego evaluar el diseño de similitud geométrica para aerogeneradores de eje vertical.

El análisis del comportamiento hidrodinámico del fluido en una región de la capa límite, según la configuración del rotor, será descrito por el modelo  $K-\omega$  de turbulencia SST, que también será empleado en la tesis objeto de estudio. Es analizado una Turbina Hidrocineética comercial a través de CFD, serán validados los datos de coeficientes de potencia, y se hará un análisis del rotor esférico-helicoidal vs el LucidPipe, ver Figura 9, bajo condiciones de velocidad de flujo. El desempeño evaluado por la correlación de las curvas de desempeño de los perfiles simétricos demostró que el perfil NACA 0020 presenta mejor desempeño que los otros perfiles.

## Figura 9

Dibujo 3D de los rotores LucidPipe (A) y esférico-helicoidal (B).



Nota: fuente Santos (2019)

Como aporte a la tesis objeto de estudio son las características de los rotores de eje vertical, por su constante velocidad relativa incidente que permite mayor facilidad en la selección del perfil aerodinámico adecuado. Asimismo, el coeficiente de potencia que cuantifica la eficiencia del rotor hidrocínético, verifica la diferencia que hay entre el rotor LucidPipe y el esférico-helicoidal, mostrados en la Figura 9, siendo el primero con resultados experimentales y el segundo por CFD, el error con relación del primero con el segundo fue para cuatro pruebas de 21.7%, 21.6%, 45% y 455% para las relaciones de velocidad de 2.0 / 2.4 / 2.8 y 3.2 respectivamente. Quiere decir, que a medida que aumenta la relación de velocidades, divergen los resultados, como consecuencia de la turbulencia generada, como se aprecia de 45% a 455%, un aumento de 410% por el cambio de relación de velocidad de 2.8 a 3.2.

### 1.2 Identificación y descripción del problema de estudio

Las comunidades rurales de la amazonia peruana carecen en gran medida de acceso a la energía eléctrica, en 2017 se determinó, mediante el reporte del tercer censo de comunidades Indígenas desarrollado por el INEI, que el 42% de las zonas rurales de la selva se ven afectados por esta realidad.

Una gran proporción de los habitantes que cuentan con energía eléctrica la obtienen mediante el uso de fuentes energéticas ineficientes tales como leña, kerosene u otro combustible fósil. Lo cual libera agentes que contaminan el medio ambiente y a su vez son causantes de enfermedades respiratorias que deterioran progresivamente la salud.

La región amazónica cuenta con un enorme potencial energético proveniente de fuentes hídricas tanto por lluvia como por la cantidad de ríos que la atraviesan, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Potencial energético de cuencas y ríos de la selva central*

CUENCA/RÍO	Sitio	Potencia	Energía media
		(MW)	(GWH/año)
Tulumayo	Tulu 10	155.5	832
	Tulu 20	166.5	1 079.2
	Tulu 30	215.5	1 336.1
	Tulu 50	243	1 510.0
	Tulu 70	198.6	1 239.8
	Subtotal	979.1	5 997.1
Palca	Palca 10	147.8	920.7
	Palca 15	122.5	798.6
	Palca 30	55.2	338.2
	Subtotal	325.5	2 057.5
Oxapampa	Oxa 20	111.7	753
	Oxa 30	35.5	249.6
	Subtotal	147.2	1 002.6
CHANCHAMAYO	Total	1 450.8	9 057.2
PAUCARTAMBO	Chan 10	70.4	438.7
	Chan 25	139.5	944.2
	Chan 29	163.8	1 003.9
	Chan 30	96.8	669.2
	Total	470.5	3 056.0
PERENÉ (Total)	Per 10	212.2	1 480.8
	Per 20	67.1	416.1
	Per 70	395.6	3 087.7
	Total	674.9	4 984.6
<b>RESUMEN:</b>			
PERENÉ (Total)		2 597.2	17 097.8
Ene	Ene-40	2 227.1	18 712.4
Tambo	Tam 40 <sup>a</sup>	1 286.5	8 324.8
TAMBO	Subtotal <sup>a</sup>	6 110.8	44 135.0
POZUZO	Poz 20	96.2	733.8
	Poz 27	237.8	1 473.7
	Poz 30	390.1	2 762.4
	Poz 50	138.3	868.5
	Subtotal	862.4	5 838.4
	Total General	6 973.2	49 973.4

*Nota:* fuente República Federal de Alemania (1981)

La falta de un fluido eléctrico confiable y constante generan diversas consecuencias tales como la dificultad para mantener cadenas de frío vitales no solo para el almacenamiento adecuado y prolongado de alimentos sino también para el

almacenamiento de material médico. Otra consecuencia es el acceso limitado a las telecomunicaciones, así como una reducida productividad debido a la falta de alumbrado, esto limita las actividades comerciales una vez se oculta el sol. Por ende, el costo de productos y servicios se incrementan. La combinación de estos efectos reduce la calidad de vida de los habitantes, así como también reduce su desarrollo social, económico y productivo.

La investigación de la presente tesis comprende el aprovechamiento de la corriente de ríos por Turbinas Hidrocinéticas. Estas capturan la energía cinética del flujo de agua en corrientes y ríos y convertirla en energía mecánica o eléctrica. A diferencia de las turbinas hidráulicas convencionales, que se utilizan en embalses o corrientes de flujo constante, las Turbinas Hidrocinéticas están diseñadas específicamente para operar en aguas en movimiento, donde la velocidad y dirección del flujo varían significativamente. Su funcionamiento se basa en el principio de transferencia de energía cinética del agua en movimiento a través de sus palas o rotores. A medida que el agua fluye a través del rotor, ejerce una fuerza sobre las palas, lo que genera un movimiento rotatorio. Este movimiento mecánico se transmite al generador acoplado, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica utilizable. Estos dispositivos son especialmente adecuados para su uso en ríos y corrientes debido a su menor impacto ambiental en comparación con las grandes represas y embalses asociados con turbinas hidráulicas convencionales. Además, las Turbinas Hidrocinéticas no requieren grandes estructuras civiles y, en muchos casos, son instaladas de manera más flexible y adaptable a las condiciones locales.

El problema de las Turbinas Hidrocinéticas es su eficiencia dado que depende de factores como la velocidad del flujo de agua, el diseño de las palas o rotores, y la profundidad del río. Se han desarrollado diferentes tipos de Turbinas Hidrocinéticas, como las de eje vertical y las de eje horizontal, cada una con sus ventajas y desafíos específicos.

Aunque las Turbinas Hidrocinéticas en ríos tienen ventajas en términos de menor impacto ambiental y mayor flexibilidad en la ubicación, también enfrentan algunos desafíos

y problemas que deben ser abordados para su implementación exitosa. Algunos de estos problemas incluyen:

1. La variabilidad del flujo en ríos, causada por factores climáticos y estacionales, impacta la eficiencia y el rendimiento de las Turbinas Hidrocinéticas, ya que su diseño se optimiza para ciertos niveles de flujo.
2. Las Turbinas Hidrocinéticas interactúan con el medio ambiente, alterando el hábitat acuático y el flujo del agua, lo que afecta la vida acuática y la migración de peces. Es esencial considerar estos aspectos en el diseño y ubicación para minimizar su impacto en el ecosistema fluvial.
3. La acumulación de sedimentos y desechos arrastrados por el río afecta la eficiencia de las Turbinas Hidrocinéticas, lo que requiere un mantenimiento frecuente para asegurar su operación continua.
4. La seguridad de navegación y pesca en ríos se ve comprometida con la presencia de Turbinas Hidrocinéticas, por lo que es necesario implementar medidas de prevención y señalización adecuadas para proteger a los usuarios del río y evitar colisiones con las turbinas.
5. La instalación y mantenimiento de las Turbinas Hidrocinéticas implica costos iniciales significativos, por lo que la eficiencia y vida útil de estas turbinas deben justificar estos gastos a lo largo del tiempo.
6. A pesar de los avances en la tecnología de Turbinas Hidrocinéticas, aún está en desarrollo y no es tan madura como otras tecnologías de generación de energía. Esto limita su adopción a gran escala y afecta la disponibilidad de proveedores y opciones en el mercado.

A pesar de los desafíos mencionados, las Turbinas Hidrocinéticas son una contribución significativa a la generación de energía sostenible y la reducción de la dependencia de fuentes de energía convencionales más contaminantes. La integración

efectiva de estas turbinas en ríos depende de la investigación continua, el diseño adecuado y una planificación cuidadosa, así como de una estrecha colaboración entre desarrolladores, comunidades locales y entidades reguladoras. Esto garantizará una abordaje adecuado de los retos y la maximización de los beneficios ambientales y económicos.

Un aspecto importante en el diseño de una Turbina Hidrocinética es el coeficiente de potencia y refiere a la eficiencia con la que la turbina convierte la energía cinética del fluido en potencia mecánica. Un bajo coeficiente de potencia significa que la turbina no está aprovechando eficientemente la energía disponible en el fluido, lo que resulta en una generación de potencia subóptima y, posiblemente, en un rendimiento insatisfactorio del sistema.

Este problema surge debido a varios factores, como un diseño inadecuado de las palas o rotores, una geometría ineficiente de la turbina, una mala elección de materiales, o incluso una incorrecta orientación con respecto al flujo del fluido. Además, la presencia de turbulencias y cambios en la velocidad del flujo de agua afecta negativamente el coeficiente de potencia de la turbina.

Para abordar este problema, los diseñadores de turbinas deben realizar simulaciones numéricas, pruebas de laboratorio y análisis exhaustivos para optimizar el diseño y maximizar el coeficiente de potencia. Esto implica la consideración de aspectos como la forma y el ángulo de las palas, la distribución del flujo de agua y la interacción entre la turbina y el medio ambiente acuático. Además, la elección de materiales resistentes y duraderos también es esencial para garantizar un rendimiento eficiente y una vida útil prolongada de la turbina.

Superar el problema de bajo coeficiente de potencia en el diseño de una turbina asegura que la instalación sea lo más eficiente y rentable posible, contribuyendo así a una generación de energía más sostenible y reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales más contaminantes.

### **1.3 Formulación del problema**

#### **1.3.1 Problema General**

¿Cómo lograr optimizar una Turbina Hidrocinética diseñada para ríos de bajo caudal y asegurar el máximo coeficiente de potencia a través de simulaciones numéricas?

#### **1.3.2 Problemas Específicos**

Así también, los problemas específicos se formulan con las siguientes interrogantes:

1. ¿Cómo analizar y modelar con precisión el comportamiento del flujo circulante a través de las palas de una Turbina Hidrocinética en ríos de bajo caudal utilizando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)?
2. ¿Cuál es el impacto específico que tienen diferentes perfiles hidrodinámicos de las palas en el cálculo del coeficiente de potencia de una Turbina Hidrocinética destinada para ríos de bajo caudal, y cómo se evalúa cuantitativamente este efecto?
3. ¿Cómo determinar experimentalmente el perfil hidrodinámico más eficiente para las palas de la Turbina Hidrocinética, considerando una variedad de velocidades angulares del rotor, con el objetivo de maximizar el coeficiente de potencia en ríos de bajo caudal?

### **1.4 Justificación e importancia**

Las Turbinas Hidrocinéticas son diseñadas con el propósito de generar electricidad a partir de la energía cinética del agua de los ríos. Según lo que mencionan Niebuhr et al. (2019) “a diferencia de otros métodos de extracción de energía potencial del agua que requieren grandes construcciones civiles y enormes cifras de inversión para ser viables”. Las turbinas hidrocinéticas se implementan de diversas formas y en diversos formatos que no requieren obras de mega ingeniería que serían disruptivas para el ecosistema.

Sin embargo, este tipo de turbinas se desempeñan mejor en flujos de alta velocidad tal como lo postulan Gunawan et al. (2017) “las turbinas hidro cinéticas sometidas a flujos

con número de Reynold entre 2000 a 4000 donde las fuerzas inerciales dominan sobre las fuerzas viscosas crean flujos inestables y turbulencia”, es por eso que no es recomendable evaluar el desempeño de flujos con rápido movimiento, por ende, en régimen turbulento no son los más adecuados para la implementación de turbinas hidro cinéticas.

La importancia de esta investigación recae en que los habitantes de zonas rurales desconectadas de la red eléctrica debido a la falta de infraestructura necesitan una opción viable que se ajuste a su realidad para optimizar el rendimiento de una Turbina Hidrocinética para ríos de bajo caudal para obtener el máximo aprovechamiento de la energía cinética de los ríos.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Optimizar una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal para garantizar el mejor coeficiente de potencia mediante simulación numérica.

### **1.5.2 Objetivo Específico**

Como objetivos específicos, se tienen:

1. Analizar mediante CFD el comportamiento del flujo circulante a través de las palas de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal.
2. Evaluar la influencia del uso de diferentes perfiles hidrodinámicos de las palas en el cálculo del coeficiente de potencia de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal.
3. Evaluar el perfil hidrodinámico de las palas más eficiente para determinada velocidad angular del rotor de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis General**

La optimización de una Turbina Hidrocinética para ríos de bajo caudal a través de simulaciones numéricas permitirá alcanzar un aumento significativo en el coeficiente de

potencia, mejorando así la eficiencia de generación de energía en este tipo de entornos fluviales.

### **1.6.2 Hipótesis Específico**

Como hipótesis específicas, se tienen:

1. El uso de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitirá comprender y modelar con precisión el comportamiento del flujo al pasar a través de las palas de la Turbina Hidrocinética en ríos de bajo caudal.
2. Se espera que la variación de los perfiles hidrodinámicos de las palas tenga un impacto significativo en el coeficiente de potencia de la Turbina Hidrocinética, y que ciertos perfiles conduzcan a una mejora sustancial en la eficiencia de generación de energía.
3. Se espera que, mediante pruebas experimentales y simulaciones numéricas, sea posible identificar un perfil hidrodinámico óptimo para las palas de la turbina a diferentes velocidades angulares del rotor, lo que llevará a maximizar el coeficiente de potencia en condiciones de ríos con bajo caudal.

### **1.7 Variables, dimensiones e indicadores**

A continuación, la operacionalización de las variables.

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	OPERACIONALIZACIÓN		ESCALA DE MEDICIÓN
			DIMENSIONES	INDICADORES	
<b>Variable dependiente (Y):</b> Y1: Coeficiente de potencia de Turbina Hidrocinética mediante simulación numérica	Es una medida adimensional que representa la eficiencia con la que la Turbina Hidrocinética convierte la energía cinética del fluido en potencia mecánica mediante simulación numérica.	Se define operacionalmente la relación entre la potencia mecánica obtenida por la Turbina Hidrocinética y la máxima potencia teóricamente disponible en el área barrida por el fluido a través de las álabes de la turbina mediante simulación numérica.	Coeficiente de potencia de Turbina Hidrocinética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia real</li> <li>• Potencia teórica</li> <li>• Coeficiente de potencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (kW)</li> <li>• (kW)</li> <li>• Adimensional</li> </ul>
			Interacción de fases de simulación numérica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de enmallado</li> <li>• Dominio computacional</li> <li>• Fuerzas viscosas sobre la superficie de perfiles</li> <li>• Torque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nominal: Tipo</li> <li>• (m3)</li> <li>• (N)</li> <li>• (K.N)</li> </ul>
<b>Variable independiente (X):</b> X1: Optimización de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal	Es el estudio detallado de las propiedades geométricas, condiciones de flujo y comportamiento de una Turbina Hidrocinética en relación con el comportamiento fluidodinámico.	Se mide mediante la evaluación de parámetros como las dimensiones geométricas óptimas de la Turbina Hidrocinética, la modelización precisa del comportamiento del fluido utilizando herramientas como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), y las RPM de las álabes en función de mejorar el coeficiente de potencia.	Geometría de la Turbina Hidrocinética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de perfil hidrodinámico de la pala (NACA 8610 y 8620)</li> <li>• Largo de la pala y radio del rotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nominal: Tipo</li> <li>• (m)</li> </ul>
			Características de operación de la Turbina Hidrocinética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contorno de presiones sobre la superficie de perfiles</li> <li>• Densidad de agua</li> <li>• Campo de velocidades de fluido</li> <li>• Área proyectada de turbina</li> <li>• Velocidad angular del rotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Pa)</li> <li>• (kg/m3)</li> <li>• (m/s)</li> <li>• (m2)</li> <li>• (RPM)</li> </ul>

## **1.8 Unidad de análisis**

La unidad de análisis se refiere al objeto de estudio es el coeficiente de potencia de una Turbina Hidrocinética de rotor de eje vertical y pala de perfil hidrodinámico NACA para ríos de bajo caudal con velocidades de flujo de 2 a 3 m/s.

## **1.9 Fuentes de información**

Las fuentes de información son:

- Esquemas referenciales de Turbinas Hidrocinéticas de la literatura de Arrieta & Ainhoa (2019).
- Informes técnicos de la ANA (Autoridad Nacional del Agua) o SENAMHI (El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú)
- Documentación de la National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- Manual de uso del Software Fluent de Ansys.

## **1.10 Tipo y nivel de investigación**

### **1.10.1 Tipo de investigación**

De acuerdo con Valle (2009), tipo de investigación se refiere al enfoque o propósito general de un estudio o proyecto de investigación, siendo así el tipo de investigación aplicada o técnica, pues se centra en mejorar Turbinas Hidrocinéticas para ríos de bajo caudal mediante simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Este enfoque técnico emplea modelos matemáticos y herramientas computacionales para analizar la interacción entre la turbina y el flujo de agua. A través de la optimización basada en CFD, se busca mejorar el diseño de las turbinas, maximizando la eficiencia en la conversión de energía cinética del agua en energía mecánica. Este estudio apunta a desarrollar turbinas más efectivas y adaptadas a condiciones de ríos con caudales reducidos, contribuyendo a la energía sostenible.

### **1.10.2 Nivel de investigación**

El nivel de investigación se refiere a la extensión o alcance de un estudio en términos de profundidad y complejidad, por lo que el nivel de investigación sería explicativo o causal, pues es un nivel más profundo y riguroso, donde se manipulará el perfil hidrodinámico de la pala en base a los criterios NACA y se realizarán simulaciones numéricas en CFD para evaluar el coeficiente de potencia y buscar explicar la relación causa-efecto del coeficiente de potencia respecto al diseño de los perfiles hidrodinámicos de las palas de la turbina de eje vertical.

### **1.11 Método de diseño de la investigación**

El diseño de investigación del diseño de una Turbina Hidrocinética para ríos de bajo caudal implica un enfoque mixto cuantitativo y cualitativo. El método cuantitativo utiliza la simulación numérica de dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar variables cuantitativas, como la distribución de presiones, velocidades y la eficiencia energética de la turbina. Este enfoque cuantitativo emplea modelos matemáticos detallados para simular el comportamiento del flujo de agua en torno a la turbina, permitiendo la optimización precisa del diseño. Se evalúan múltiples configuraciones y parámetros geométricos para maximizar la eficiencia energética y minimizar las pérdidas hidráulicas.

El método cualitativo complementa este enfoque al considerar aspectos subjetivos y cualitativos, como la robustez estructural, la durabilidad de los materiales y la viabilidad práctica del diseño optimizado. Esto implica la consideración de factores no exclusivamente numéricos, sino también la experiencia práctica, la viabilidad técnica y económica, así como la capacidad de fabricación de la turbina propuesta.

La combinación de ambos métodos permite un diseño holístico y completo, donde la simulación numérica CFD proporciona una comprensión detallada del comportamiento fluidodinámico para mejorar la eficiencia, mientras que la evaluación cualitativa garantiza que el diseño optimizado sea factible, duradero y práctico en condiciones reales, en consonancia con restricciones técnicas y económicas.

## **1.12 Población y muestra**

### **1.12.1 Población**

La población de la investigación es solo la Turbina Hidrocinética de rotor de eje vertical y su coeficiente de potencia inspiradas de la literatura de Arrieta & Ainhoa (2019).

### **1.12.2 Muestra**

La muestra de la investigación es la Turbina Hidrocinética de rotor de eje vertical

## **1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para el análisis de la respuesta de la turbina hidro cinética, se emplearán simulaciones numéricas mediante software de ingeniería, que permita representar la interacción del fluido con la turbina, además que permita introducir variaciones en la geometría base de la turbina, así como también definir un dominio rotatorio de velocidad angular variable. De esta manera se obtendrá el modelo óptimo de acuerdo con las características geométricas del diseño y a la velocidad angular de rotación de la turbina hidro cinética. Sobre la base de esta técnica se obtendrán resultados como: diseño optimo y valores teóricos de la eficiencia máxima mediante la aplicación de esta técnica.

Respecto a la recolección de datos, son utilizados datos de caudales en ríos dados por instituciones nacionales, las cuales se encuentran documentados en informes técnicos de la ANA (Autoridad Nacional del Agua) o SENAMHI (El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). Para la recolección de información geométrica para el diseño de la turbina se emplearán perfiles estandarizados tipo NACA, los cuales están documentados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en su página institucional.

## **1.14 Análisis y procesamiento de datos**

Se realizará un estudio paramétrico considerando la configuración geométrica de la turbina, así como su velocidad angular. Esta data paramétrica será analizada mediante una superficie de respuesta la cual es ajustada en el software de ingeniería.

A continuación, se menciona el procedimiento dado en los siguientes ítems:

- 1) Verificación numérica de perfiles hidrodinámicos mediante “*benchmarks*” en 2D, estos perfiles son de tipo NACA, el 8610 y 8620, ambos son estándar y se adecuan a la configuración del rotor de eje vertical.
- 2) Propuesta de Turbina Hidrocinética para una velocidad de flujo en el rango de 2-3 m/s.
- 3) Turbina Hidrocinética optimizada mediante simulación numérica, utilizando el Fluent de ANSYS Academic versión 2022.
- 4) Obtención de la velocidad angular y configuración geométrica óptima, y el coeficiente de potencia obtenido mediante la conversión de la energía cinética de ríos.

El análisis de datos se lleva a cabo a partir de la optimización numérica, por lo cual se parametrizará la geometría de la turbina hidro cinética, específicamente el perfil hidrodinámico de las palas, y la velocidad angular de operación con lo cual se obtendrán diferentes valores de coeficiente de potencia, lo cual es determinante en la obtención de la optimización. Además, el análisis implica una metodología que considera el comportamiento de fluidos, lo cual es requerido para realizar el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Por último, la simulación numérica se ha realizado en computadoras especiales en la Biblioteca Central de la UNI, que cuentan con licencia ANSYS Academic 2022, con el paquete de CFD, el Fluent.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En este capítulo se mencionará los fundamentos teóricos respecto a las fuentes de energía, los ríos, el método de volúmenes finitos, entre otros conceptos que relacionan al trabajo en simulación numérica y Turbinas Hidrocinéticas.

#### 2.1 Fuentes de energía

Las fuentes de energía se clasifican entre las fuentes convencionales y las fuentes no convencionales.

##### 2.1.1 Fuentes convencionales

##### a) Energía termoeléctrica

**Figura 10**

*Central termoeléctrica*



Nota: fuente Osinergmin (2020)

“La energía termoeléctrica es la que usa el calor para generar electricidad. El mecanismo principal de funcionamiento consiste en usar el calor para aumentar la temperatura de un fluido hasta que este se evapora. El vapor liberado activa una turbina, la cual comienza a girar, convirtiéndose en energía cinética; además, está conectada a un generador que produce electricidad debido al movimiento.” (Enérgya, 2020, 29 julio). Se observa el conjunto de los elementos mencionados en la Figura 10.

### **b) Energía hidroeléctrica**

Según afirma ENEL (s.f.), “la energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable que resulta del aprovechamiento del caudal de los ríos mediante la construcción de represas”.

#### **Figura 11**

*Central de embalse*



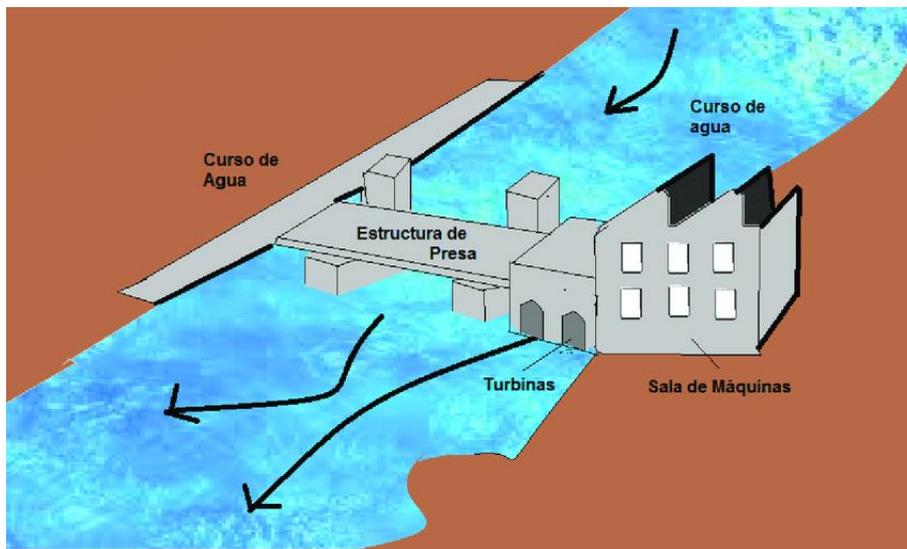
*Nota: fuente iagua (s. f.)*

En la Figura 11 se observa una central de embalse, dichas construcciones dejan caer el agua acumulada en la parte superior de una represa sobre una turbina hidráulica, haciendo que estas giren y produzcan electricidad mediante generadores eléctricos localizados en la sala de máquinas. Posteriormente, se eleva su tensión para transportar la energía sin pérdidas significativas para que después se incorpora a la red eléctrica. Adicionalmente, el agua utilizada retoma su curso natural.

La Figura 12 muestra una central hidroeléctrica de pasada, aquí se aprovecha la irregularidad natural del río para desviar el agua a través del cauce hasta la central donde las turbinas se mueve en eje vertical u horizontal generando energía eléctrica de manera similar a las centrales de embalse, siendo las turbinas de eje vertical más eficiente. Este tipo de centrales operan de forma continua ya que no tienen capacidad para almacenar el agua.

### Figura 12

Central hidroeléctrica de pasada



Nota: fuente Alvarez (s. f.)

### Figura 13

Central de bombeo



Nota: fuente El Periódico de la Energía (s. f.)

La Figura 13 muestra una central de bombeo, estas funcionan como método de almacenamiento, puesto que se consume energía para transportar el agua hasta el

embalse superior en horas en que la demanda de electricidad es baja y se libera cuando el consumo eléctrico es elevado.

### 2.1.2 Fuentes no convencionales

#### a) Energía solar

Según Ballesteros et al. (2008) la energía proveniente del sol se aprovecha de dos formas distintas:

- Energía solar termoeléctrica:

Consiste en la transmisión de energía calorífica que se aprovecha para producir energía mecánica mediante un ciclo termodinámico y por intermedio de un alternador generar energía eléctrica. La Figura 14 muestra un ejemplo de transmisión de energía calorífica usando espejos.

#### Figura 14

*Central solar termoeléctrica*



*Nota:* fuente Greenpeace (2016)

- Energía fotovoltaica:

Es la energía que se produce por la transformación en los elementos semiconductores que componen los paneles solares fotovoltaicos ilustrados en la Figura 15, estos materiales absorben corpúsculos luminosos haciendo que la energía potencial de su estructura se incremente. La electricidad generada se utiliza directamente, almacenarse en baterías e incluso alimentarse a la red de distribución de energía.

**Figura 15**

*Central fotovoltaica*



*Nota: fuente MINEM (2018)*

**b) Energía de biomasa**

Es la energía que se obtiene de la combustión de materia orgánica que genera grandes cantidades de calor que sirven para transformar agua en vapor que mediante un ciclo proceso termodinámico hace girar una turbina y mediante un generador se transforma en energía eléctrica. (ENDESA, s. f.)

**c) Energía geotérmica**

**Figura 16**

*Central geotérmica*



*Nota: fuente Rumbo Minero (2020)*

Según Osinergmin (s.f.) es la energía que se obtiene aprovechando el calor del interior de la Tierra como se observa en la Figura 16. En algunas áreas cercanas a la superficie, el agua subterránea alcanza temperaturas de ebullición y, por lo tanto, se usa para impulsar el aire expandido a turbinas conectadas a generadores eléctricos.

#### **d) Energía mareomotriz**

La energía mareomotriz utiliza la diferencia de altura media de los mares y tiene una variedad de lugares en el que se aprovecha, por ejemplo, estuarios utilizando turbinas hidráulicas, ver Figura 17, en que se interponen en el movimiento natural de las aguas, mediante un movimiento en un eje, junto con un alternador se utiliza el sistema para la generación de electricidad.

#### **Figura 17**

*Central mareomotriz*



*Nota:* fuente Blanco, T. A. (2022, 11 enero)

#### **e) Energía mini hidráulica**

De acuerdo con Osinergmin (s.f.) consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial de un río, cascada o marea. En Perú, las pequeñas centrales hidroeléctricas son aquellas con una potencia instalada igual o inferior a 20 MW. Esta es la forma más ecológica de generar electricidad.

## f) Energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía renovable que se obtiene de la energía cinética del viento que mueve las palas de los aerogeneradores que se muestran en la Figura 18, que a su vez activa la turbina para convertirla en energía eléctrica. (Osinergmin, s. f.)

### Figura 18

#### Central eólica



Nota: fuente Osinergmin (s. f.)

## 2.2 Ríos

Según la RAE se define como la corriente de agua continua y más o menos caudalosa que va a desembocar en otra, en un lago o en el mar. De acuerdo con el diccionario de hidrología y ciencias afines un río es un escurrimiento de agua concentrado de un curso permanente o semipermanente que presenta una cabecera y una desembocadura. Se clasifican a los ríos por su carácter, condición de estabilidad y posición topográfica.

### 2.2.1 Según su carácter

#### a) Ríos permanentes

Según Gracia y Maza (1997) “son ríos que se presentan en zonas donde se presentan lluvias abundantes o donde hay pocas fluctuaciones en el año “.

## **b) Ríos temporales**

“Son ríos que se presentan en zonas donde hay estaciones muy diferenciadas, con inviernos húmedos y veranos secos o viceversa” (Gracia y Maza, 1997).

### **2.2.2 Según su condición de estabilidad**

#### **a) Ríos estáticos**

De acuerdo a Gracia y Maza (1997) “son ríos cuya corriente es capaz de arrastrar sedimentos, pero no arrastra los elementos de las orillas, es el caso de los ríos con orillas rocosas o de alta cohesión”.

#### **b) Ríos dinámicos**

Gracia y Maza (1997) afirman que “son ríos cuya variación de corriente los materiales de la plantilla, de las orillas, y los sedimentos transportados no cambian apreciablemente año con año”.

#### **c) Ríos con inestabilidad dinámica**

“Son ríos que escurren solo por un cauce, el desplazamiento lateral de los meandros es muy intenso y no logra estabilizar su corriente” (Gracia y Maza, 1997).

### **2.2.3 Según su ubicación topográfica**

#### **a) Ríos de montaña o juveniles**

Gracia y Maza (1997) expresan que “son ríos irregulares que generalmente están en proceso de degradación. Se encuentran en los cauces de montaña; tienen pendientes altas y sección transversal tipo “V””.

#### **b) Ríos de transición (maduros, de planicie, viejos)**

“Son ríos estables, se encuentran en valles amplios y tienen pendientes relativamente bajas; la erosión de los márgenes ha reemplazado a la erosión del fondo y la sección transversal en cada tramo es capaz de transportar la carga de sedimento en todo su recorrido” (Gracia y Maza, 1997).

## 2.3 Turbinas Hidrocinéticas

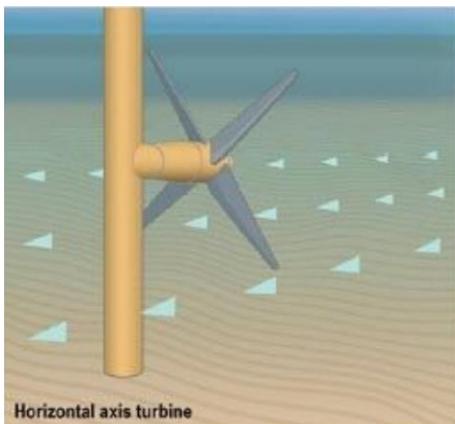
### 2.3.1 Turbinas horizontales

Hyams (2012) sostiene que las turbinas horizontales modernas utilizan la sustentación hidrodinámica para rotar cada pala del rotor. Similar a cómo vuelan los aviones. Se observa una disposición típica de una turbina horizontal en la Figura 19.

En general, la fuerza de sustentación funciona de la siguiente manera. Cuando se expone al flujo, el agua se mueve sobre la parte superior e inferior de las aspas. Sin embargo, debido a la curvatura de las aspas, el agua pasa más rápido por la parte superior a través de las aspas, esto genera una zona de baja presión en la parte superior. La diferencia de presión entre la parte superior y la parte inferior de la pala ejerce una fuerza hacia arriba de la pala.

#### Figura 19

*Ejemplo de turbina horizontal*



*Nota: fuente Chu (2019)*

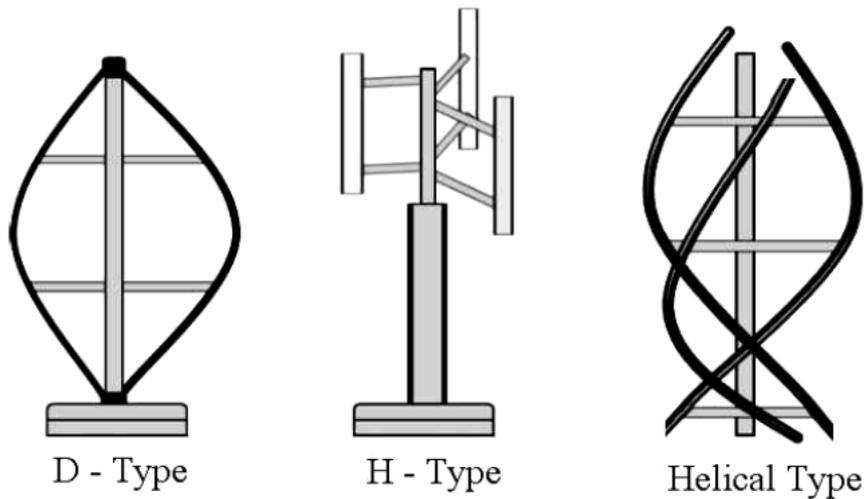
### 2.3.2 Turbinas verticales

#### a) Rotor Darrieus

El rotor tipo Darrieus está compuesto por 3 palas unidas a un eje rotatorio central el cual está alejado de las palas, el diseño original contempla tres variantes, como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20**

*Diseño típico de una turbina Darrieus.*



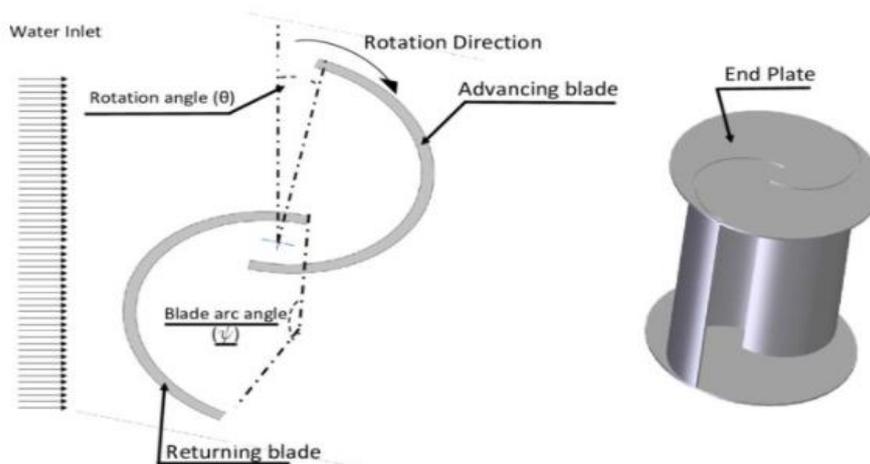
*Nota: fuente Das & Talapatra (2016)*

Este diseño de turbina tiene un punto débil debido a que cada pala tiene dos puntos máximos de torque, cuando esta frente y detrás de la turbina en relación a la dirección del flujo, esto causa que el ciclo de potencia sea de carácter sinusoidal, por lo cual las turbinas Darrieus deben contar con sistemas de frenos que eviten frecuencias resonantes con la estructura.

### **b) Rotor Savonius**

**Figura 21**

*Diseño típico de una turbina Savonius*



*Nota: fuente Kerikous, E., & Thévenin, D. (2018)*

Este tipo de turbina emplea las fuerzas de arrastre, por lo general constan de 2 o 3 palas, el diseño típico que se muestra en Figura 21 de estas turbinas es usar palas semicirculares, al ser sometidas a la velocidad del fluido se genera mayor arrastre en una de las palas lo cual inicia la rotación. Este tipo de turbina se acciona con menor fuerza del fluido debido a su función de arrastre. Soporta mejor las turbulencias, así como un arranque con flujos de reducida velocidad.

## 2.4 Modelos de turbulencia

### 2.4.1 Modelo K-ε

El modelo K-ε ha sido diseñado específicamente para capas de corte planas y para flujos recirculantes, este modelo es ampliamente usado y validado en gran variedad de aplicaciones industriales. El modelo comprende dos ecuaciones, la energía cinética turbulenta y la disipación.

Para la energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2u_t E_{ij} E_{ij} - \rho * \varepsilon \quad (1)$$

En la ecuación 2 se formula para la disipación ε:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2u_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} * \rho * \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

Donde:

$u_i$ : Componente de la velocidad en la dirección correspondiente

$E_{ij}$ : Componente de la tasa de deformación

$u_t$ : Viscosidad de eddy

También incluyen parámetros ajustables como  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}$  y  $C_{2\varepsilon}$ . Estos valores han sido determinado mediante numerosas iteraciones de ajuste de datos para un gran rango de flujos turbulentos de acuerdo con Versteeg y Malalasekera (2007) se consideran los siguientes valores.

$$C_u = 0.09 \quad (3)$$

$$\sigma_k = 1.00 \quad (4)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (5)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad (6)$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (7)$$

### 2.4.2 Modelo K- $\omega$

Según Wilcox (2008) este modelo intenta predecir la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales para la variable K y la variable  $\omega$  (omega), la primera variable representa la energía cinética de la turbulencia mientras que la segunda variable es la tasa específica de disipación.

El par de ecuaciones es el siguiente:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho * P - \beta * \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \sigma_k \frac{\partial k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha * \omega}{k} P - \beta * \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (9)$$

### 2.4.3 Modelo SST

De acuerdo a Arrieta y Clemente (2019) “el modelo SST (Transporte del esfuerzo cortante) por sus siglas en inglés fue desarrollado para proveer una respuesta ante la necesidad de modelos que representaran flujos aeronáuticos con fuertes y adversos gradientes de presión y separación de capa límite, combina el modelo K- $\omega$  en regiones cercanas a paredes sólidas con el modelo K- $\varepsilon$  para los flujos de corriente libre”. Además, según los autores Gorle et al. (2016) el modelo SST da buenos resultados para el análisis por CFD de turbinas hidrocínicas.

## 2.5 Método de volúmenes finitos (mvf)

Neill et al. (2018) sostienen que el método de volúmenes finitos está basado en una malla no estructurada, es decir, por lo general los nodos de los elementos no están conectados, es por eso que a diferencia del método de elementos finitos se adapta mejor

a geometrías complejas. El MVF se fundamenta en la forma integral de las leyes de conservación, esto conduce a una mayor precisión y estabilidad de los resultados. Se escribe la ecuación de continuidad en forma diferencial de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Donde  $u, v$  y  $w$  son las componentes de la velocidad del flujo en las direcciones “x”, “y” y “z”. La forma integral de esta ecuación para un determinado volumen de control o un “volumen finito” se escribe así:

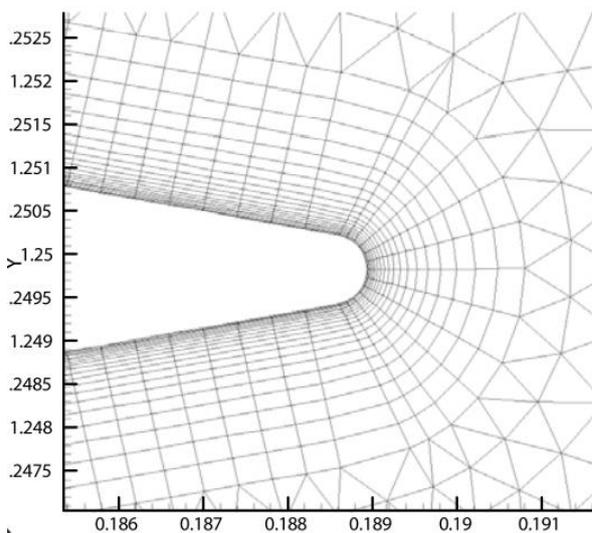
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (11)$$

Donde  $V$  representa el volumen de control,  $S$  es la superficie de control,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  en conjunto con  $S$  representan el vector de la superficie. Por lo tanto, conforme a la ecuación 11, el cambio de masa dentro de un volumen finito más los flujos de masa a través de la superficie de control deben sumar cero para el equilibrio de volumen finito.

### 2.5.1 Enmallado de la geometría

**Figura 22**

*Malla típica*



Nota: fuente Chen et al. (2015)

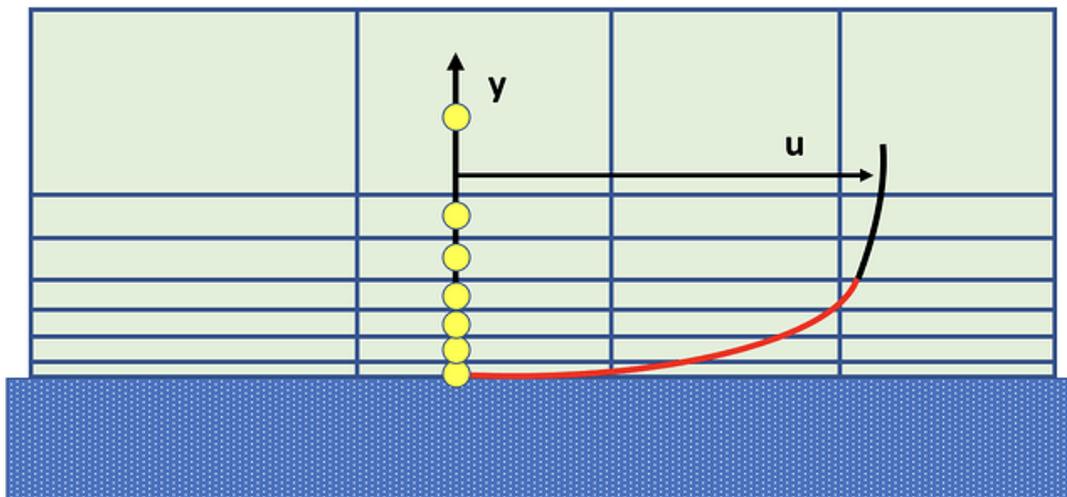
Para poder capturar la interacción del fluido con la geometría se debe definir una malla, como se mencionó previamente no es necesario una malla estructurada, sin

embargo, es necesario que las capas cercanas a las paredes de la geometría sean pequeñas de forma similar a la Figura 22, es decir mientras más cerca más pequeño el tamaño del volumen, a esto se le llama capas de inflación. El parámetro inflación “ $y^+$ ” gobierna el crecimiento del tamaño de malla. El “ $y^+$ ” es una función de pared, que originalmente se empleó para relacionar el comportamiento de la velocidad del fluido a determinada distancia de la pared como se muestra en la Figura 23.

Ahora esta función se emplea para modelar la región cercana a la pared. Lo cual reduce de manera significativa el costo computacional ya que a medida que se aleja, se incrementa el tamaño de los volúmenes.

**Figura 23**

*Capas cercanas a la pared*



*Nota: fuente Murad (2018)*

## 2.6 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia de una turbina se determina principalmente por la relación entre la potencia eléctrica obtenida y la energía, en este caso, cinética que transporta el flujo de agua que atraviesa la turbina. Según Kosky et al. (2013) el coeficiente se expresa de la siguiente manera:

$$C_P = 2 * \frac{P_{obtenida}}{\rho * v^3 * A} \quad (12)$$

Donde:

$C_P$ : Coeficiente de potencia

$P_{obtenida}$ : Potencia eléctrica obtenida

$\rho$ : Densidad del fluido

$v$ : velocidad del fluido

$A$ : Área transversal

## 2.7 Relación velocidad-punta

“Debido a que al momento de que el flujo atraviesa las aspas de la turbina este se vuelve turbulento la siguiente pala no podrá extraer eficientemente la potencia de dicho fluido, en cambio sí se disminuye la velocidad de rotación se podría evitar este fenómeno” (REUK, 2021)

Es por esto que se emplea la relación velocidad-punta, la cual es una relación entre la velocidad de las puntas de las aspas y la velocidad del fluido, un factor a tomar en cuenta es que a menor cantidad de aspas se observa en menor cantidad este fenómeno.

## 2.8 Fuerzas de sustentación y arrastre

### Figura 24

*Fuerza de sustentación y arrastre*



El fluido ejerce una fuerza cuando interactúa con un cuerpo u objeto generando una presión hidrostática producto de la fuerza de sustentación que es perpendicular a la dirección del flujo, ver Figura 24, pero la fuerza de arrastre es paralela a la dirección del fluido y es la que genera la resistencia del objeto en interacción con el fluido. Tomando en consideración el fluido, la fuerza de sustentación va a contrarrestar la fuerza de gravedad porque la distribución de las fuerzas está en ángulo recto con el flujo.

## 2.9 Marco conceptual

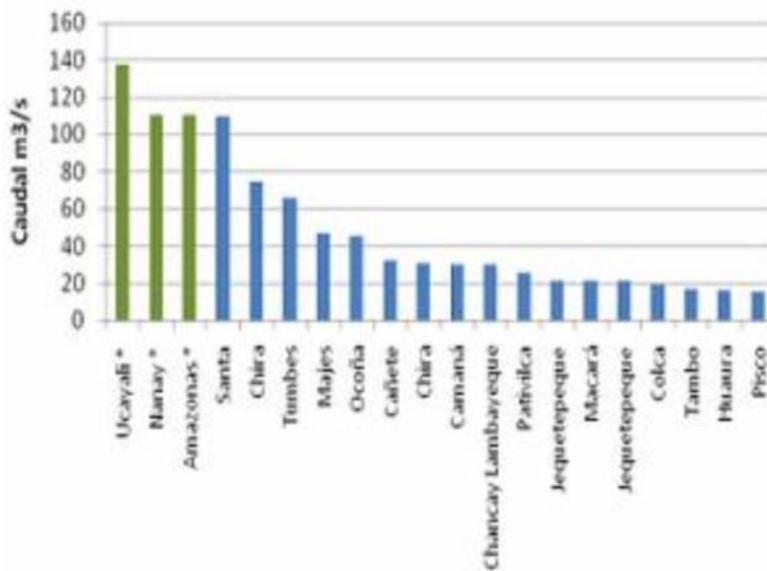
### 2.9.1 Ríos de bajo caudal

Si bien el Perú cuenta con ríos con caudales en el orden de los miles de metros cúbicos por segundo, tales como el río Ucayali, el río Nanay y el río Amazonas, los siguientes ríos más caudalosos entran en el rango de 20 a 100 metros cúbicos por segundo empezando por el río Santa y en último lugar el río Pisco como se observa en la Figura 25.

Cabe resaltar que para esta comparativa se consideró el top 20 de ríos más caudaloso del país, por lo cual se considerará de bajo caudal aquellos ríos que en promedio anualmente no superen los 8 m<sup>3</sup>/s de caudal.

**Figura 25**

*Caudal promedio mensual, barras verdes en escala distinta*



*Nota:* fuente MIDAGRI

### 2.9.2 Turbina Hidrocinética

Una Turbina Hidrocinética es aquel mecanismo que generan energía a partir de la energía cinética proveniente de algún flujo de agua, en comparación a otras turbinas que aprovechan la energía potencial de agua en caída. El diseño es por lo general simple sin reservorios o aliviaderos, causando un mínimo impacto ambiental. Estos factores contribuyen a un costo de instalación y mantenimiento bajo.

### **2.9.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD)**

Las herramientas de CFD encontradas en software de ingeniería transforman las ecuaciones gobernantes de los principios físicos fundamentales del flujo de fluidos en formas algebraicas discretizadas, las cuales se resuelven para encontrar el campo de flujo en un tiempo y espacio determinados, Los resultados de la simulación son sensibles al extenso número de parámetros que deben ser configurados por el investigador, para una simulación típica se deben definir las variables de interés, los modelos de turbulencia, el dominio computacional, la malla computacional, los métodos de discretización y el criterio de convergencia.

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DE LA TESIS**

En este capítulo se va a desarrollar la propuesta de solución que comprende los pasos metodológicos, de análisis y criterios para la determinación de una Turbina Hidrocinética optima respecto a un rotor de eje vertical definido sometido a la evaluación del coeficiente de potencia de dos perfiles hidrodinámicos para elegir el óptimo entre ellos utilizando la simulación numérica.

#### **3.1 Geometría de Turbina Hidrocinética**

##### **3.1.1 Elementos principales**

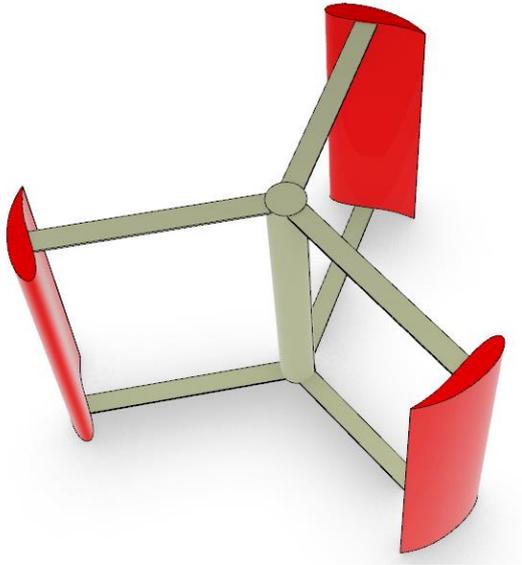
###### **a) Pala**

El elemento principal para el funcionamiento de la Turbina Hidrocinética es la pala. Este elemento tiene distintas formas en su sección transversal, sin embargo, se busca determinar para el caso de los perfiles tipo NACA, aquel que otorgue mayor potencia en un mismo entorno.

Además, el número de palas y su efecto ha sido estudiado por diversos investigadores como Arrieta & Ainhoa (2019), los cuales han llegado a un consenso el cual es que en la mayoría de los casos con 3 palas se obtiene el rendimiento máximo para una turbina de este tipo debido a que el flujo turbulento que deja a su paso es alcanzado por la siguiente pala, lo cual causa que esta absorba menos energía y por ende genere menos momento sobre el eje.

## Figura 26

*Palas de la Turbina Hidrocinética, en rojo.*



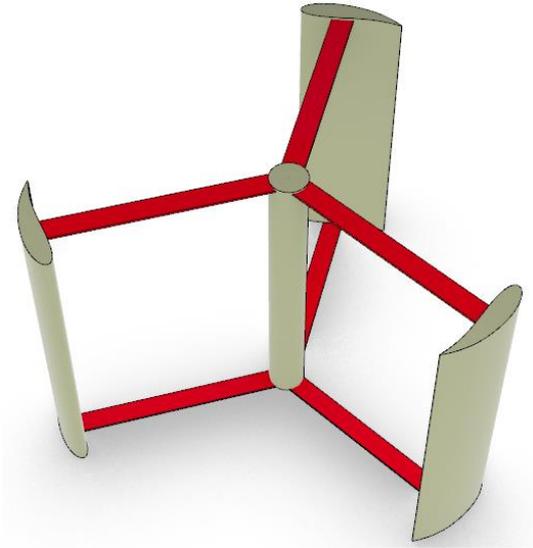
### **b) Soportes**

Los soportes de las palas son los encargados de transmitir el torque generado por la corriente hacia el eje, este elemento además debe soportar el peso de las palas, por lo cual está sometido a un esfuerzo combinado de flexión en 2 direcciones. La longitud, es decir el radio de la turbina, depende de las cargas que vaya a soportar, por lo cual se deben establecer factores de seguridad para asegurar un diseño confiable que además sea ligero y con una alta rigidez para evitar vibraciones que desestabilicen el sistema.

Si bien estos equipos operan a bajas revoluciones, su principal objetivo es brindar un acceso confiable y constante de energía eléctrica a un costo accesible para comunidades con dificultad de acceso a la red eléctrica, por lo cual se prioriza un diseño simple que requiera de poco mantenimiento y que sea económico. Para lo cual se emplearán longitudes conservadoras basándose en el trabajo de Arrieta & Clemente (2019).

**Figura 27**

*Soportes de la Turbina Hidrocinética, en rojo.*

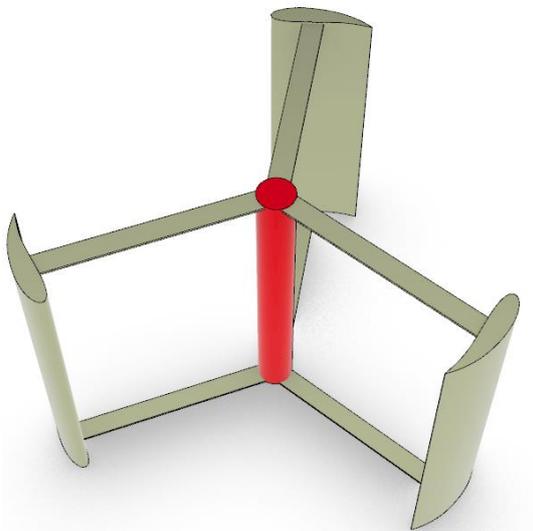


**c) Eje**

El eje es el elemento encargado de transmitir la energía cinética producida por la turbina hacia el exterior, donde se podrá convertir en energía eléctrica. Este cuerpo está sujeto principalmente a cargas de torsión, por lo cual se debe elegir si emplear un cuerpo de tipo tubular o sólido, lo ideal es que este cuerpo sea lo más delgado posible de tal manera que su efecto sobre el flujo incidente sea mínimo y por lo tanto despreciable.

**Figura 28**

*Eje de la Turbina Hidrocinética, en rojo.*



### 3.1.2 Dimensiones principales

A continuación, en la Tabla 3 se presentan las dimensiones principales que se tomará en cuenta para el modelo de la Turbina Hidrocinética a analizar. Con las dimensiones se modela la geometría 3D, ver Figura 29.

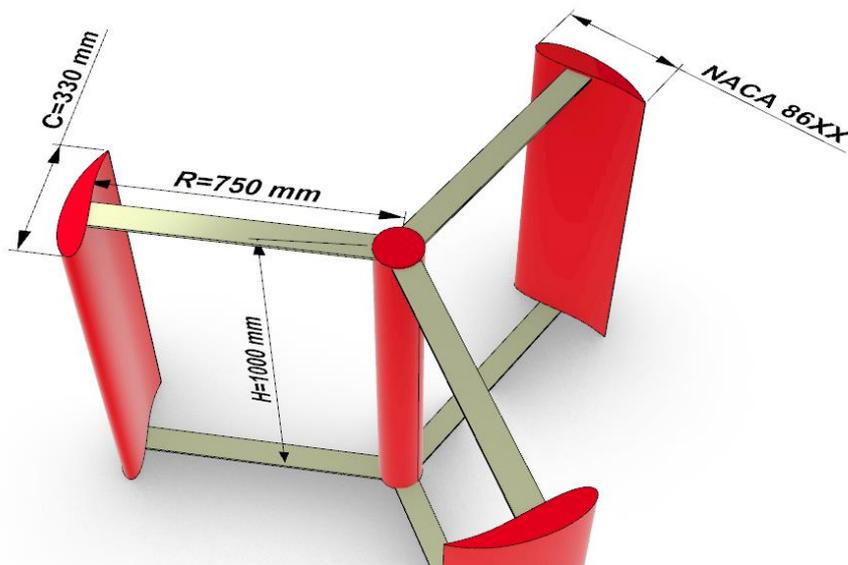
**Tabla 3**

*Dimensiones principales*

Dimensión	Símbolo	Valor	Unidades
Perfil Naca	-----	86XX	s/u
Longitud del perfil	C	330	mm
Numero de Palas	N	3	s/u
Radio de la turbina	R	750	mm
Altura de la turbina	H	1000	mm

**Figura 29**

*Dimensiones principales de la Turbina Hidrocinética.*



## 3.2 Parámetros de análisis

### 3.2.1 Velocidad angular ( $\omega$ )

Se tomará como primer parámetro la velocidad angular de operación, para determinar la velocidad óptima para cada modelo planteado en la cual se obtendrá la máxima conversión de energía.

Para esto se determinará un rango de velocidades a probar las cuales están expuestas en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Velocidades de operación*

Dimensión	Símbolo	Valor	Unidades
Velocidad angular	w	---	rpm
Mínima	Wmin	20	rpm
Máxima	Wmáx	90	rpm

### 3.2.2 Perfil NACA

Para determinar la influencia del tipo de perfil sobre la potencia obtenida en la Turbina Hidrocinética que cuenta con un diseño y geometría del soporte definido, se emplearán 2 perfiles tipo NACA de 4 dígitos con distinto valor de espesor de perfil para evaluar la selección que garantice mayor coeficiente de potencia, optimizando la turbina resultante, tal y como se observa en la Tabla 5.

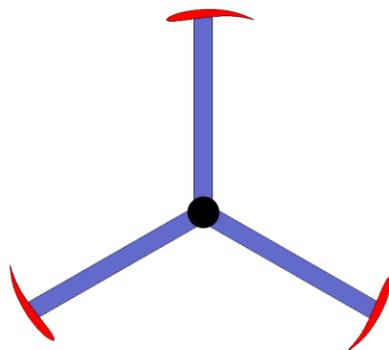
**Tabla 5**

*Perfiles Naca*

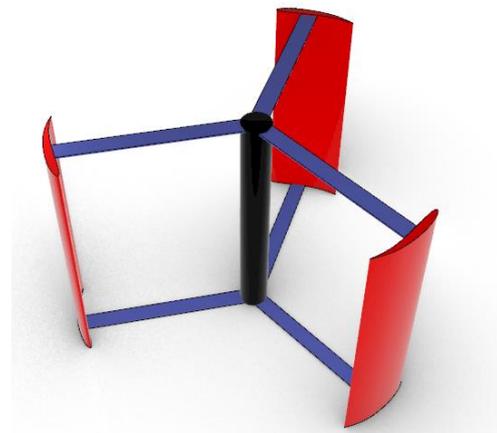
TIPO DE PERFIL	Curvatura Máxima (% de C)	Posición de la curvatura máxima (*10% de C)	Espesor (% de C)
NACA	---	---	---
PERFIL 1	8	6	10
PERFIL 2	8	6	20

**Figura 30**

*Turbina Hidrocinética 8610*



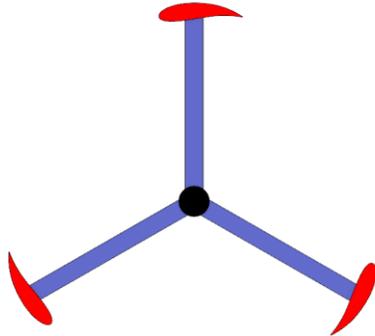
VISTA SUPERIOR TURBINA CON PERFIL NACA 8610



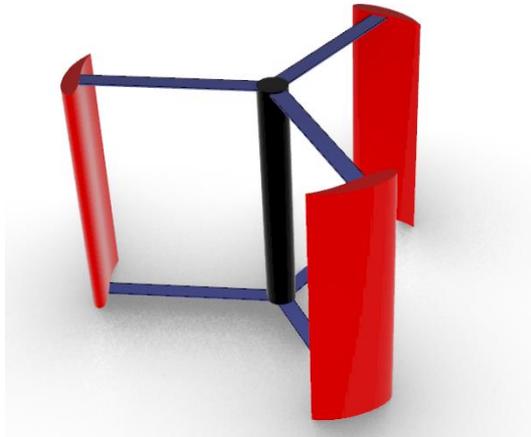
VISTA 3D TURBINA CON PERFIL NACA 8610

## Figura 31

### Turbina Hidrocinética 8620



VISTA SUPERIOR TURBINA CON PERFIL  
NACA 8620



VISTA 3D TURBINA CON PERFIL NACA 8620

## 3.3 Simulación por CFD

### 3.3.1 Geometría y dominio

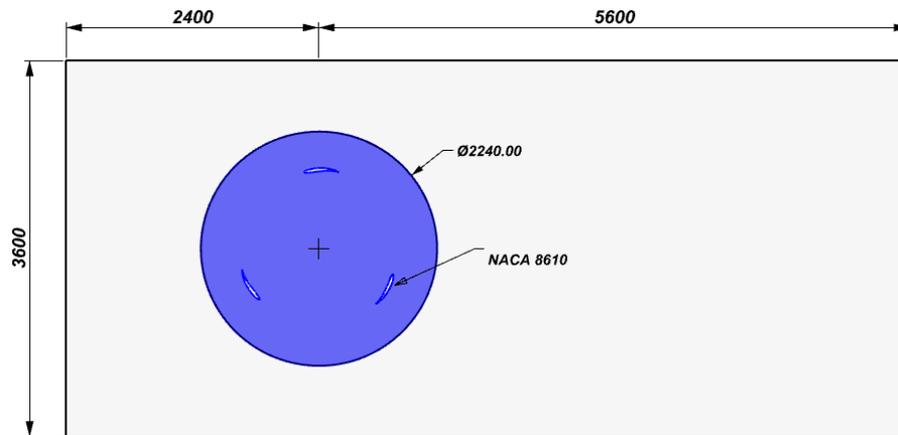
Para la simulación por CFD que se realizará en ANSYS Academic – Fluent, se despreciará el cuerpo de los soportes, así como el cuerpo del eje, debido a que para los distintos análisis se mantendrán constantes, por lo cual, si bien tendrían algún efecto sobre la respuesta, la diferencia entre ambos casos sin los cuerpos será baja, por tanto, despreciable. Además, el análisis por CFD será en 2 dimensiones, con lo que se evaluará el corte transversal del cuerpo de la turbina.

Respecto al dominio de la simulación, ver Figuras 32 y 33, se propone el siguiente esquema:

- Dominio estático (En blanco)
- Dominio rotatorio (En azul)

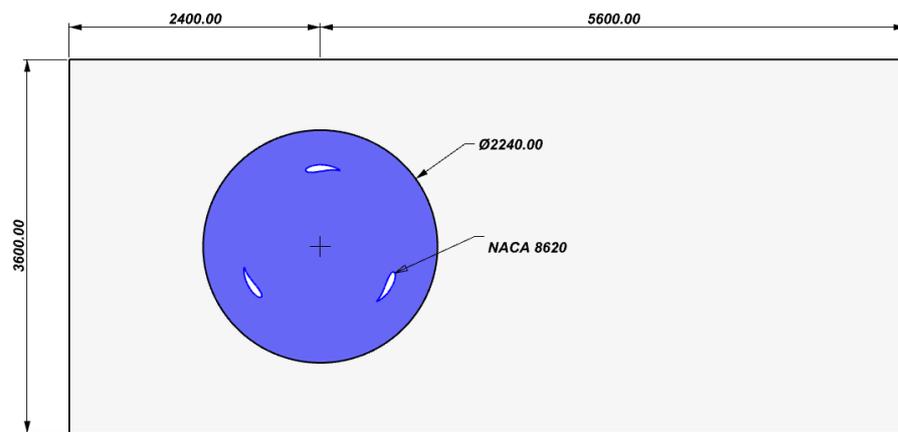
**Figura 32**

*Geometría de Turbina Hidrocinética con NACA 8610 a 20 RPM*



**Figura 33**

*Geometría de Turbina Hidrocinética con NACA 8620 a 20 RPM*



### 3.3.2 Enmallado

El enmallado del dominio debe representar de manera fiel el contorno de las palas de la turbina, ya que de ello dependerá la fidelidad de los resultados para ello se emplearon distintos tamaños de malla e inflaciones cercanas a la discontinuidad los cuales se detallan en la Tabla 6 y se visualizan para los dos tipos de perfiles NACA.

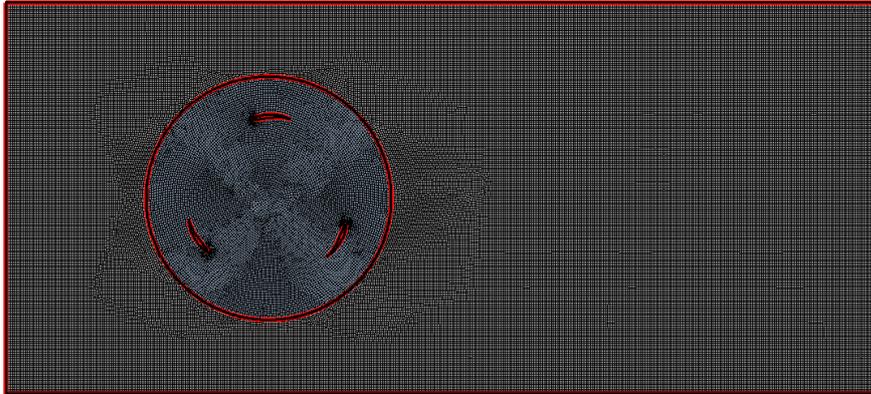
**Tabla 6**

*Tamaños de malla*

TIPO DE PERFIL	TAMAÑO DE MALLA ESTÁTICA	TAMAÑO DE MALLA ROTATORIA	ALTURA DE LA INFLACIÓN	CANTIDAD DE CAPAS	FACTOR DE CRECIMIENTO
8610	20	20	15mm	10	1.1
8620	150	20	25mm	10	1.1

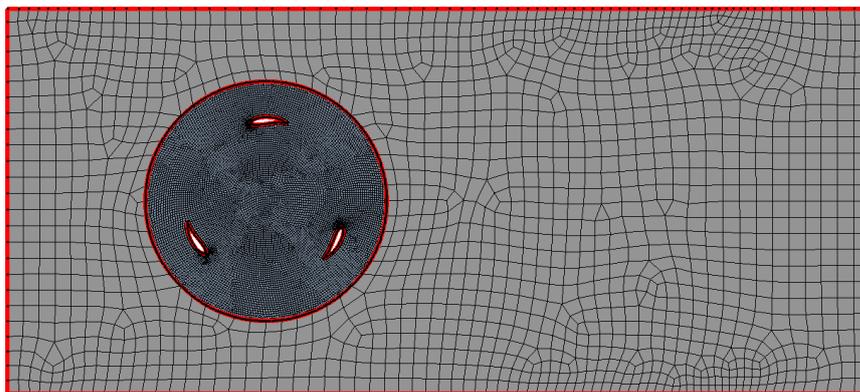
**Figura 34**

*Enmallado de Turbina Hidrocinética con NACA 8610*



**Figura 35**

*Enmallado de Turbina Hidrocinética con NACA 8620*



### 3.3.3 Condiciones de contorno

Para las condiciones de contorno se consideran tanto la entrada como la salida del flujo, así como las paredes del dominio.

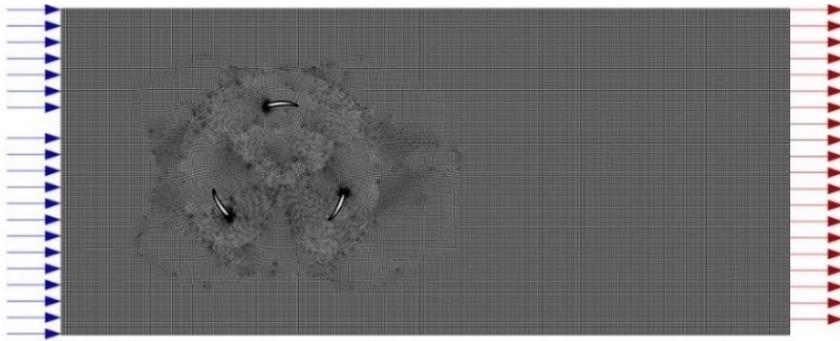
**Tabla 7**

*Condiciones de contorno*

TIPO DE PERFIL	ENTRADA	SALIDA
8610	2.5 m/s	ABIERTA
8620	2.5 m/s	ABIERTA

**Figura 36**

*Condiciones de contorno para Turbina Hidrocinética*



## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

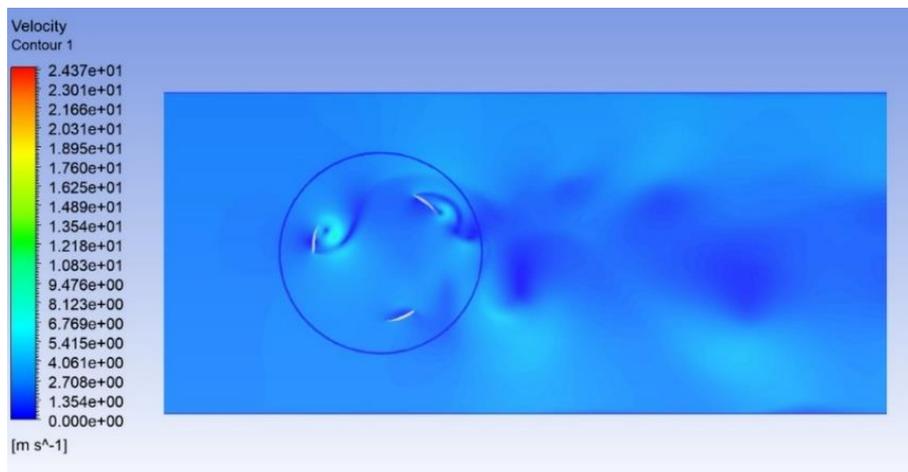
Para la aplicación, se evalúa en simulación las turbinas hidrocínicas con perfil NACA 8610 y 8620 a diferentes velocidades angulares del rotor de eje vertical para el diseño propuesto.

#### 4.1 Resultados de Turbina Hidrocínética con perfil NACA 8610

A continuación, se presentarán los resultados de campo de velocidades y de presiones para cada velocidad angular analizada:

##### Figura 37

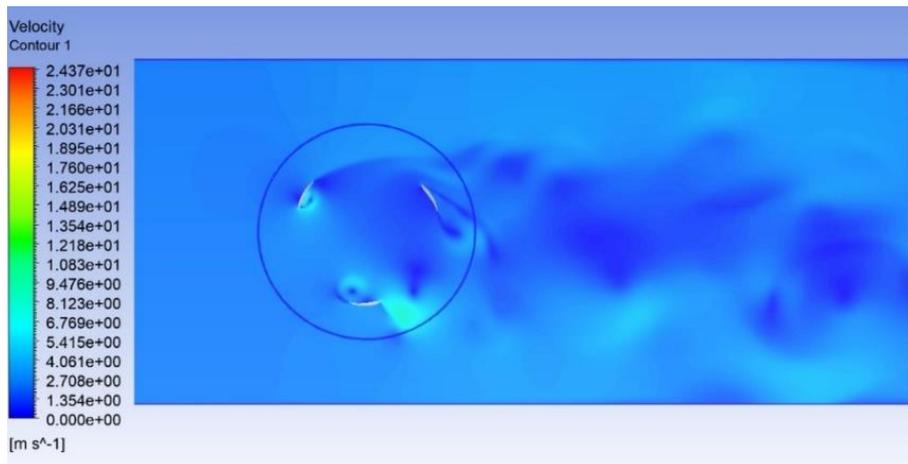
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 20 RPM.*



*Nota:* fuente Ansys – Fluent

**Figura 38**

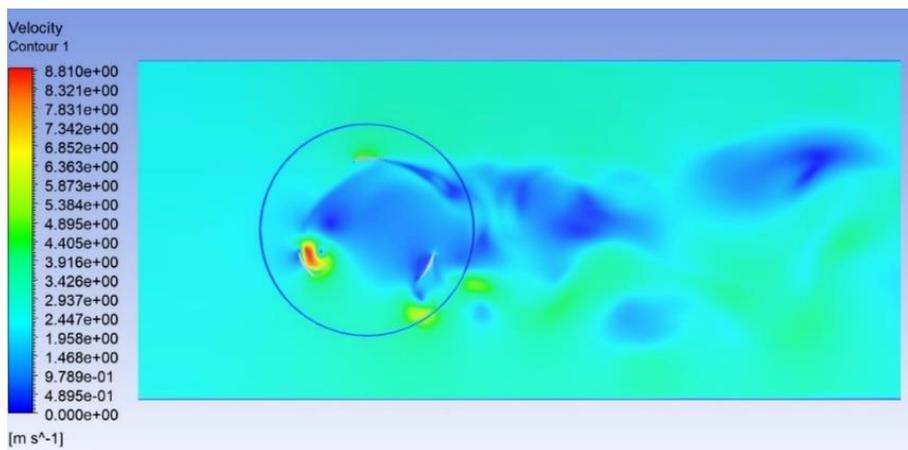
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 30 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 39**

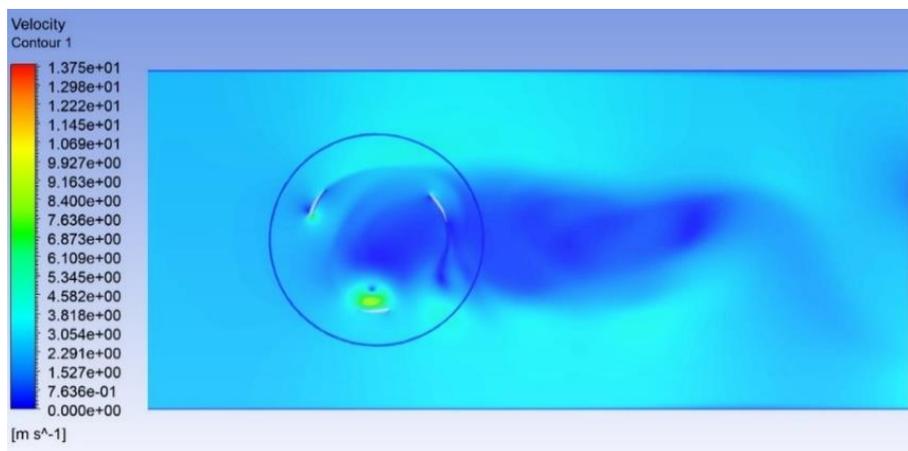
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 40 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 40**

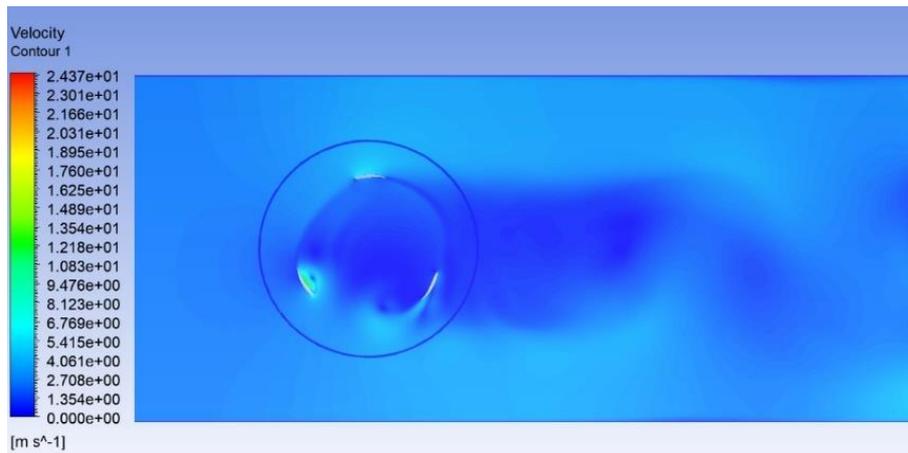
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 50 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 41**

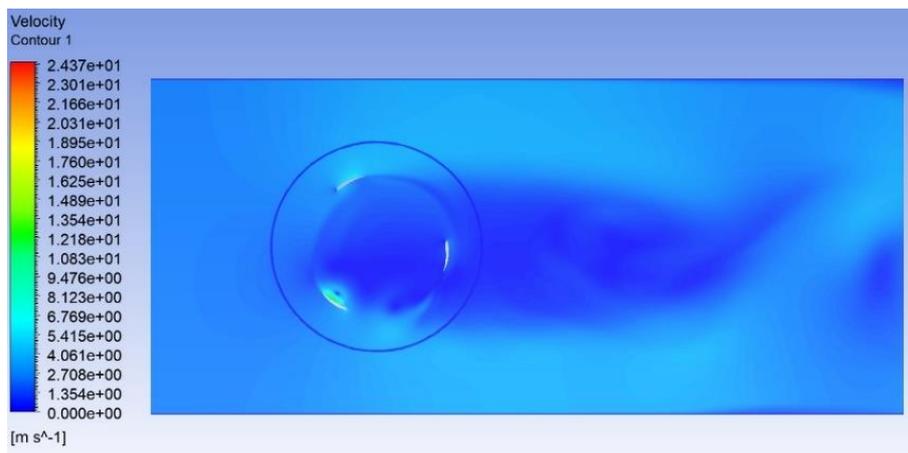
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 60 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 42**

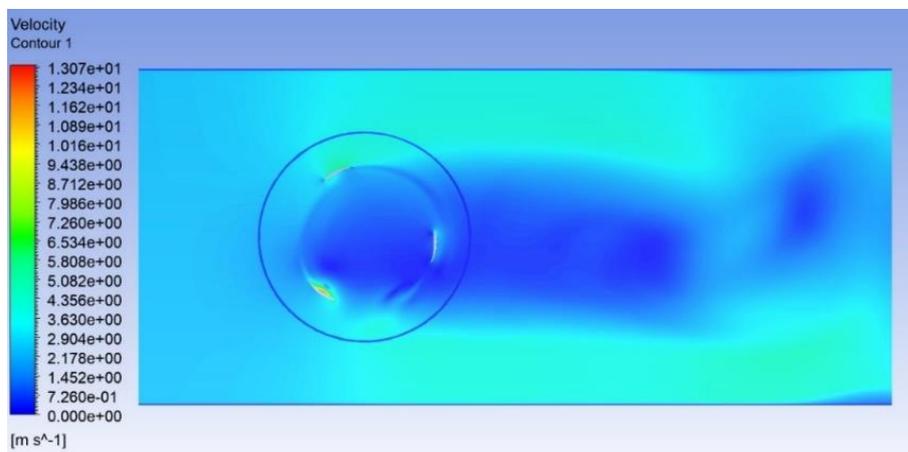
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 70 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 43**

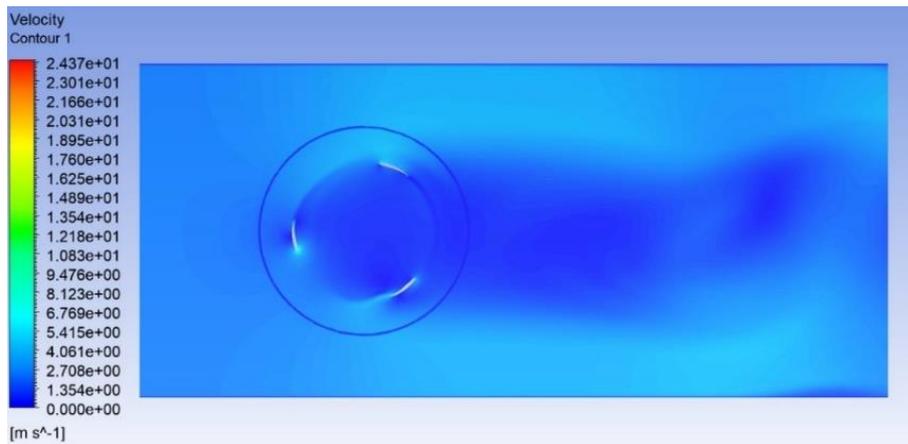
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 80 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 44**

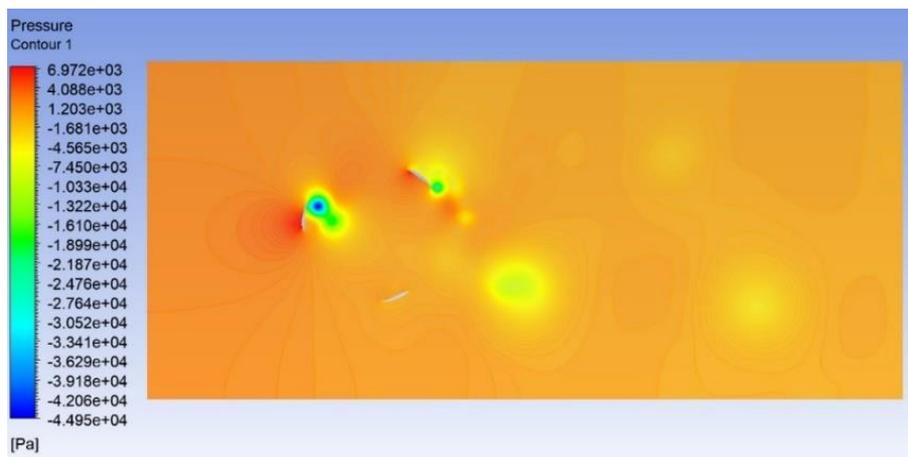
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8610 a 90 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 45**

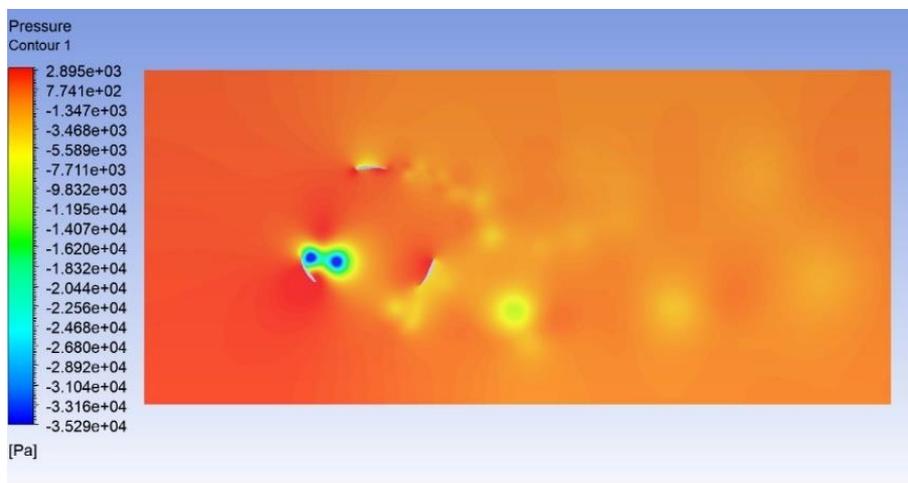
*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 20 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 46**

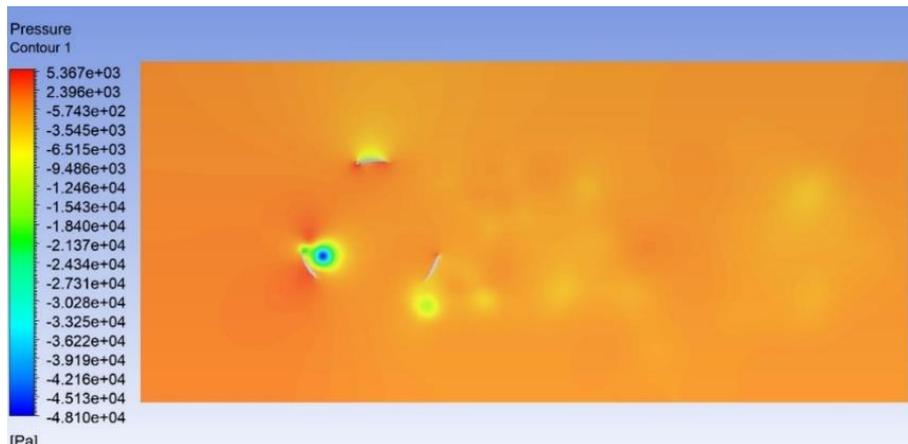
*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 30 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 47**

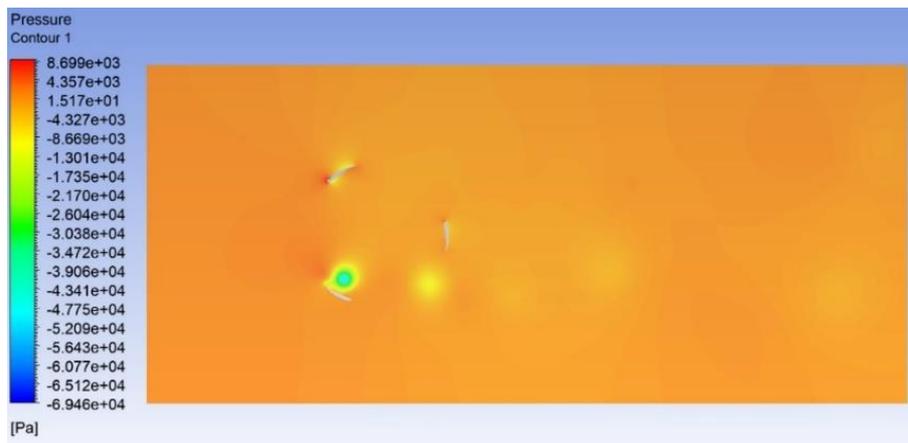
*Campo de presiones turbina con NACA 8610 a 40 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 48**

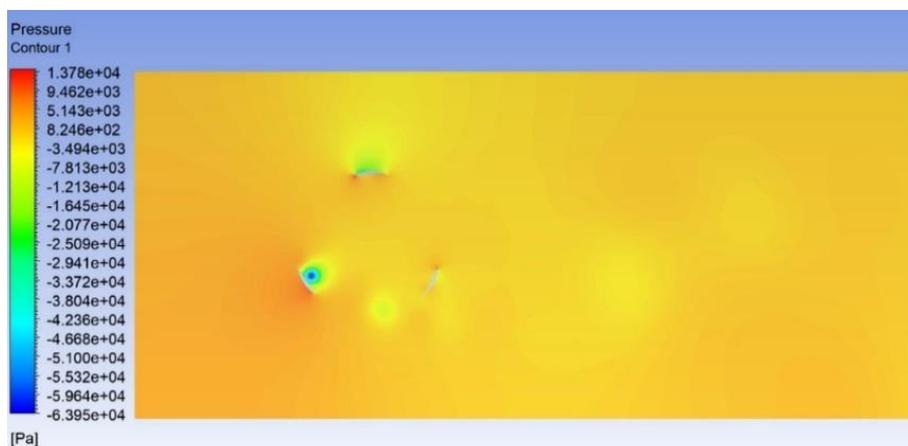
*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 50 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 49**

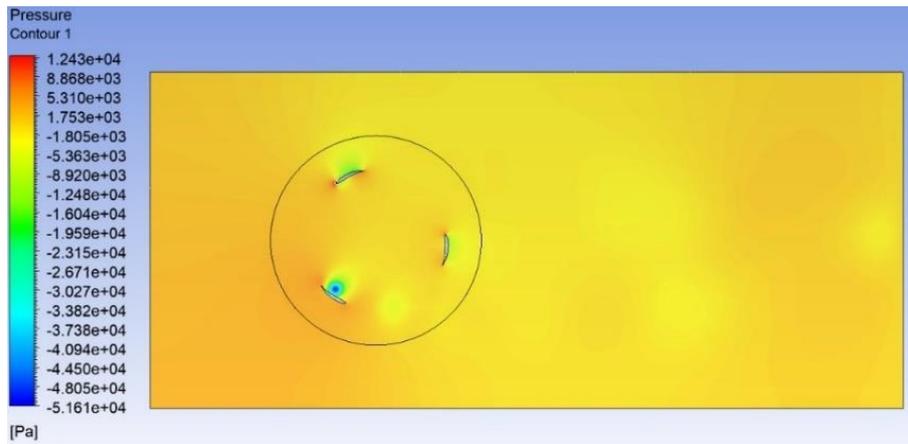
*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 60 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 50**

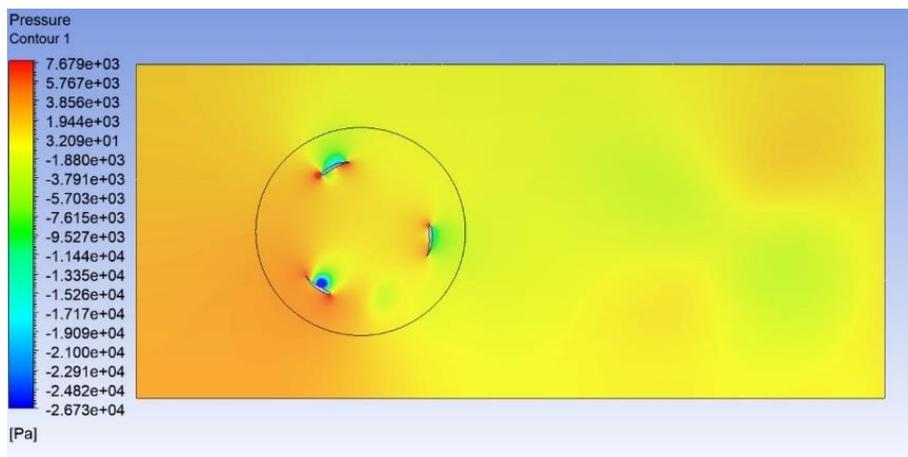
*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 70 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 51**

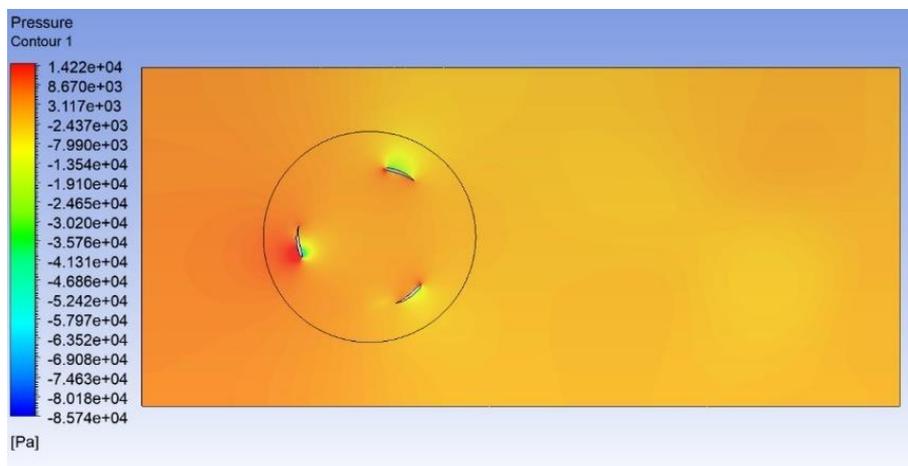
*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 80 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 52**

*Campo de presiones de turbina con NACA 8610 a 90 RPM.*



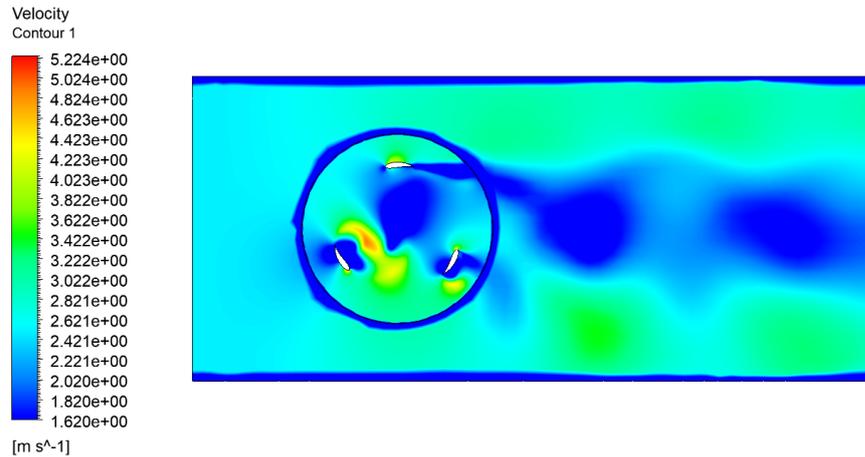
Nota: fuente Ansys – Fluent

## 4.2 Resultados de Turbina Hidrocinética con perfil NACA 8620

A continuación, se presentarán los resultados de campo de velocidades y de presiones para cada velocidad angular analizada:

**Figura 53**

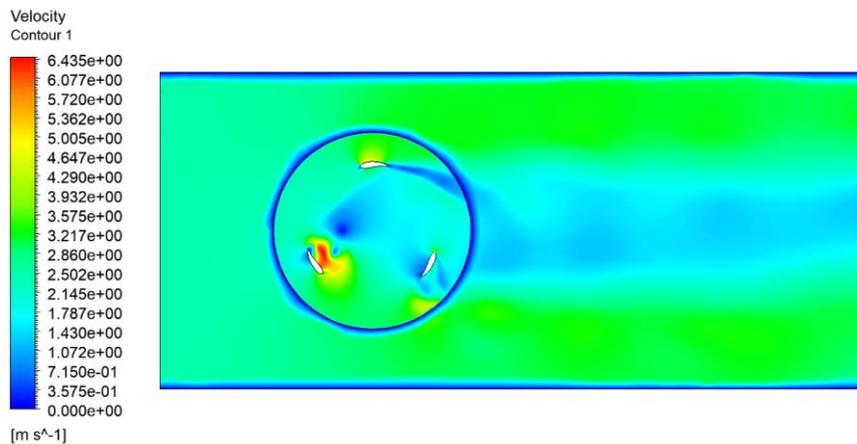
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 20 RPM.*



*Nota:* fuente Ansys – Fluent

**Figura 54**

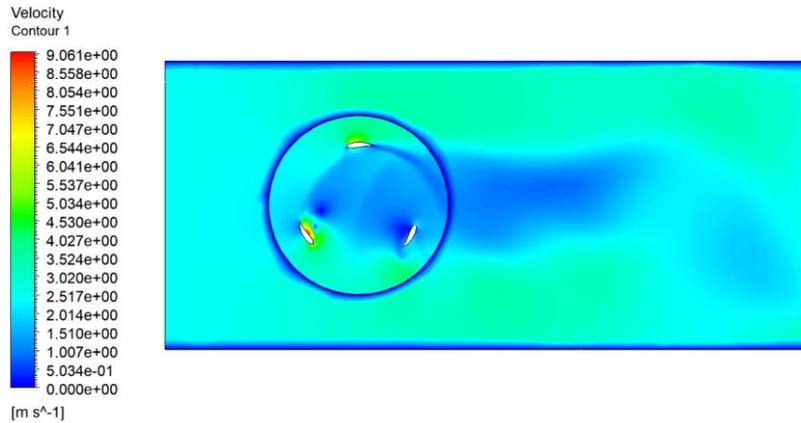
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 30 RPM.*



*Nota:* fuente Ansys – Fluent

**Figura 55**

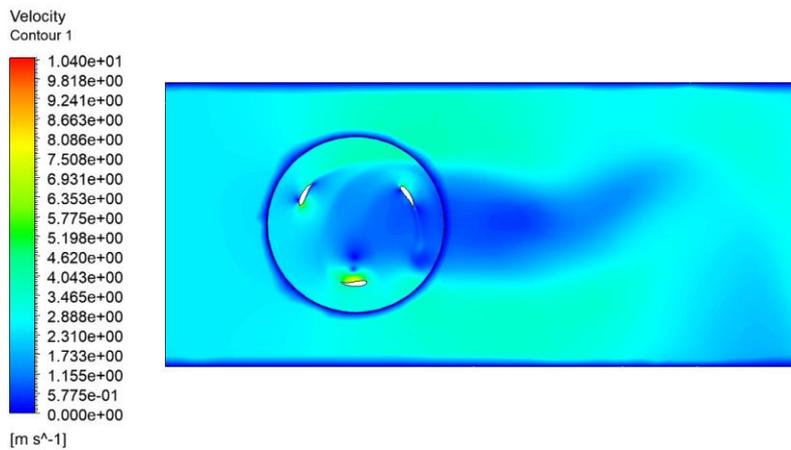
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 40 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 56**

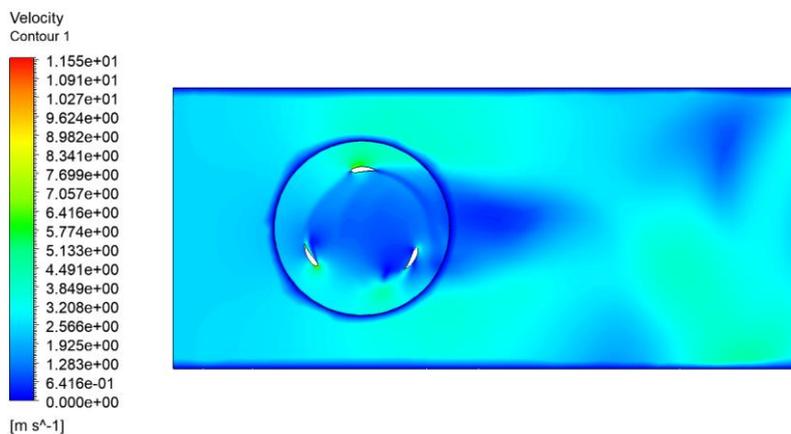
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 50 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 57**

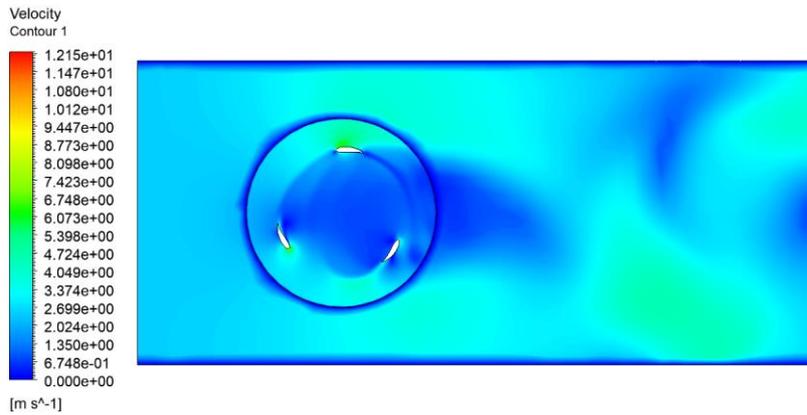
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 60 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 58**

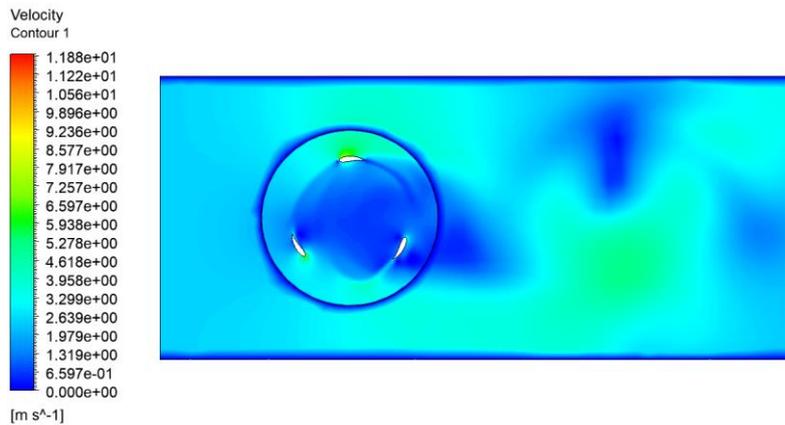
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 70 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 59**

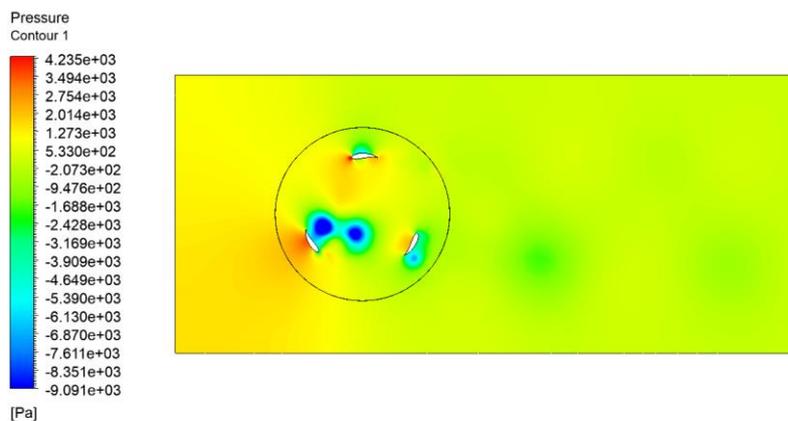
*Campo de velocidades de turbina con NACA 8620 a 80 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 60**

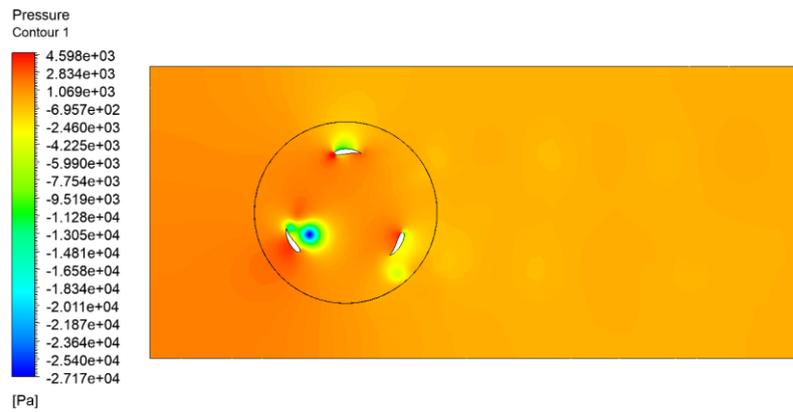
*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 20 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 61**

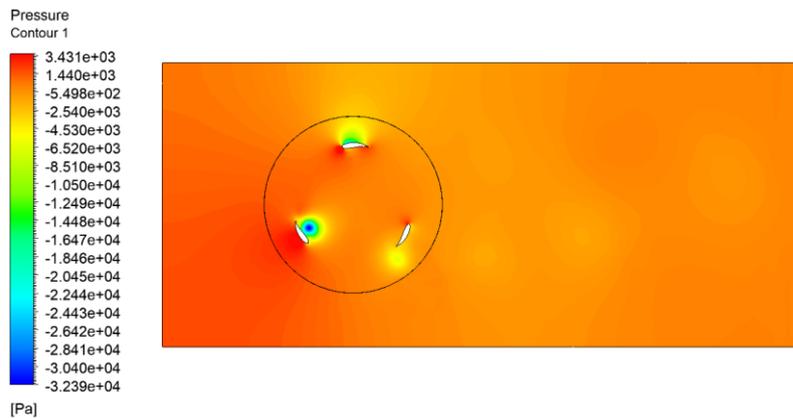
*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 30 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 62**

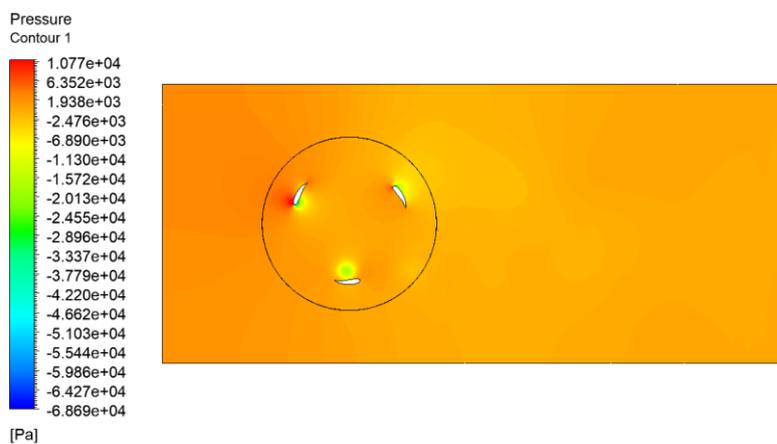
*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 40 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 63**

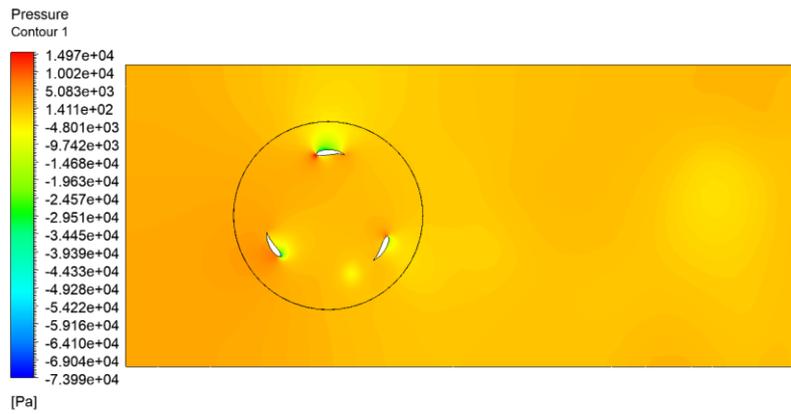
*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 50 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 64**

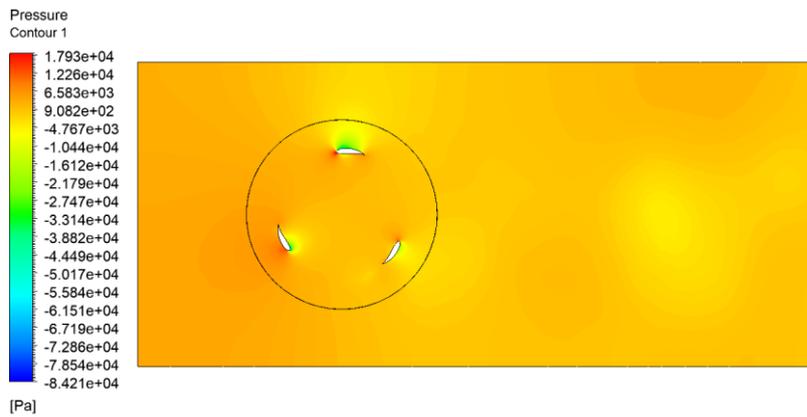
*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 60 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 65**

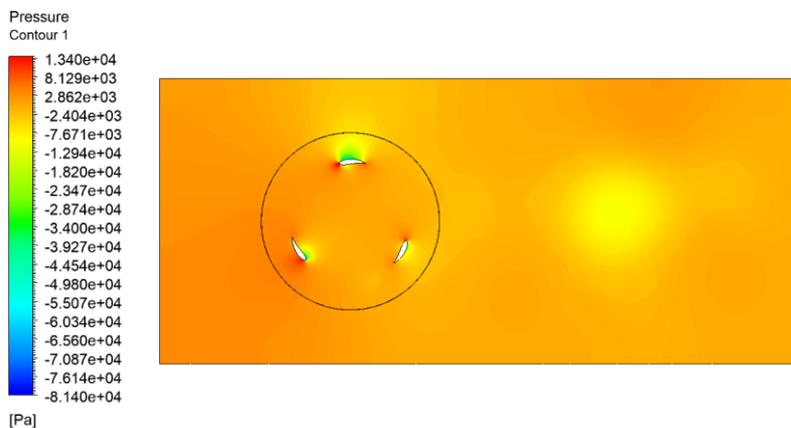
*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 70 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 66**

*Campo de presiones de turbina con NACA 8620 a 80 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

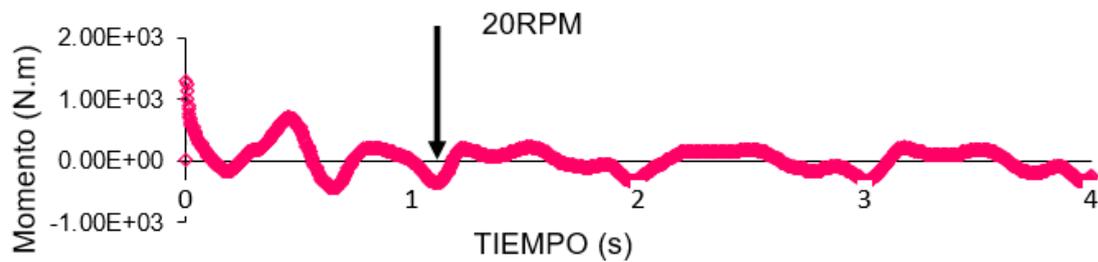
### 4.3 Serie temporal del momento del eje vertical

#### 4.3.1 Series con turbina con perfil NACA 8610

A continuación, se muestra la respuesta de la Turbina Hidrocinética con perfil NACA 8610 en una serie temporal para cada velocidad angular de las cuales se obtuvieron resultados, además se resalta un punto en el tiempo en el cual se estabiliza la respuesta.

**Figura 67**

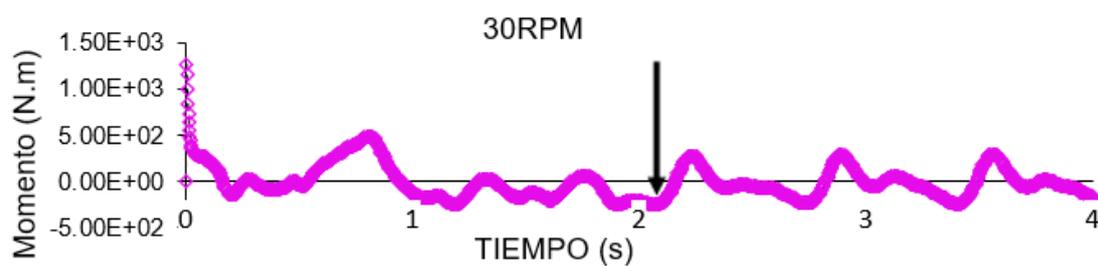
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 20 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 68**

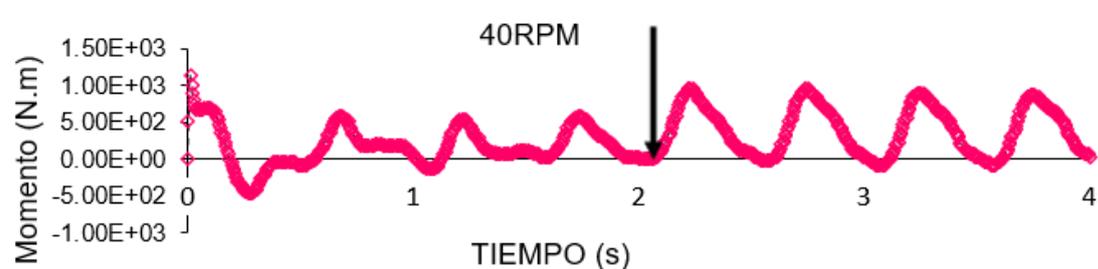
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 30 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 69**

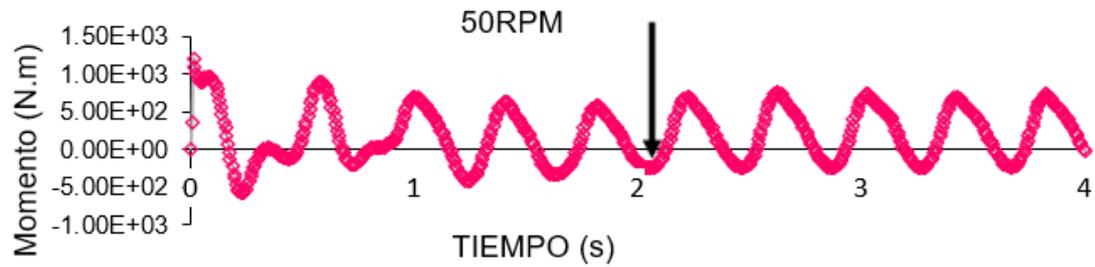
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 40 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 70**

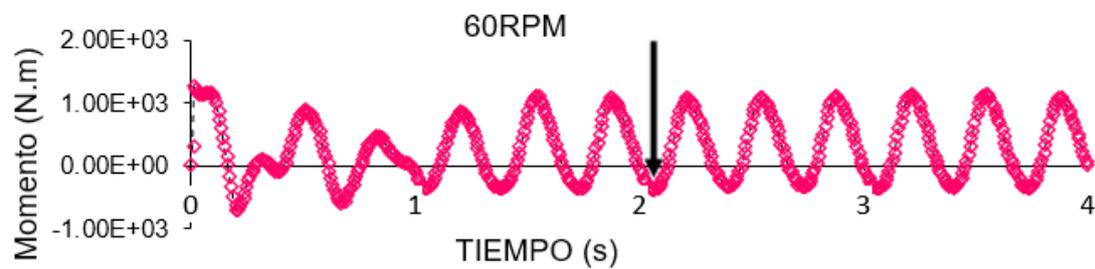
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 50 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 71**

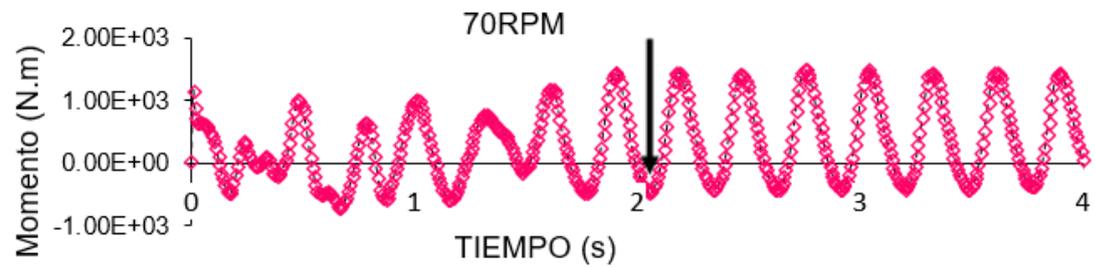
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 60 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 72**

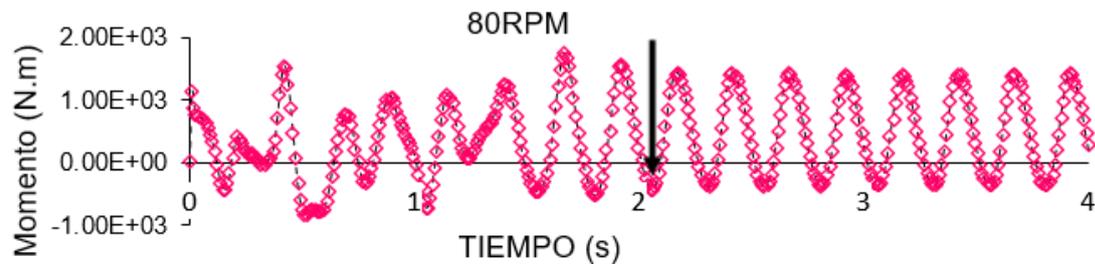
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 70 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 73**

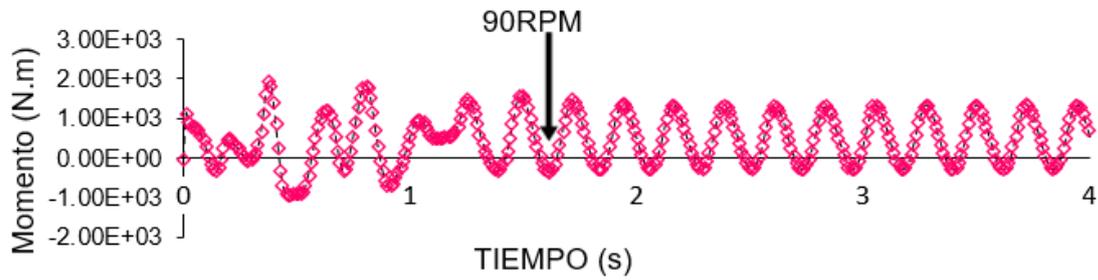
*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 80 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 74**

*Serie temporal de turbina con NACA 8610 a 90 RPM.*



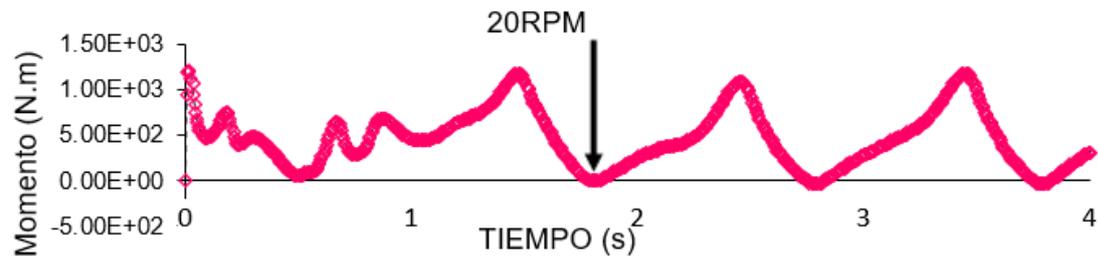
Nota: fuente Ansys – Fluent

#### **4.3.2 Series con turbina con perfil NACA 8620**

A continuación, se muestra la respuesta de la Turbina Hidrocinética con perfil NACA 8620 en una serie temporal para cada velocidad angular de las cuales se obtuvieron resultados, además se resalta un punto en el tiempo en el cual se estabiliza la respuesta.

**Figura 75**

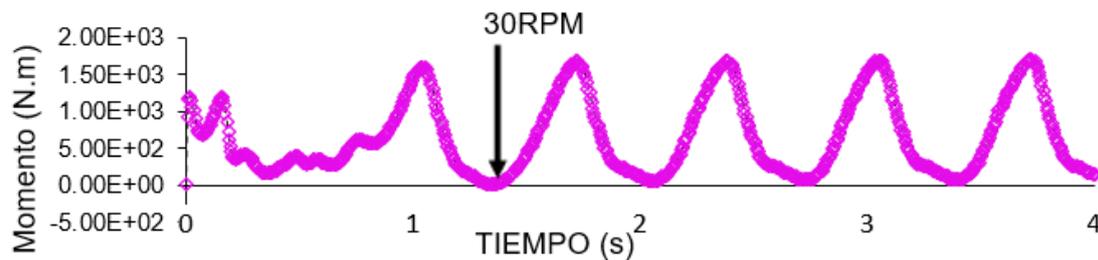
*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 20 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 76**

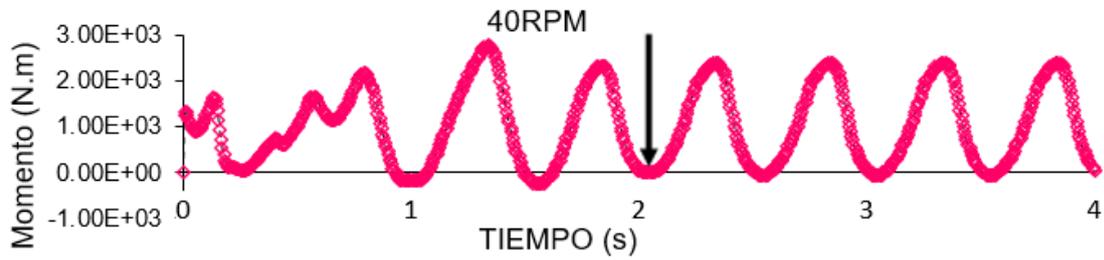
*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 30 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

**Figura 77**

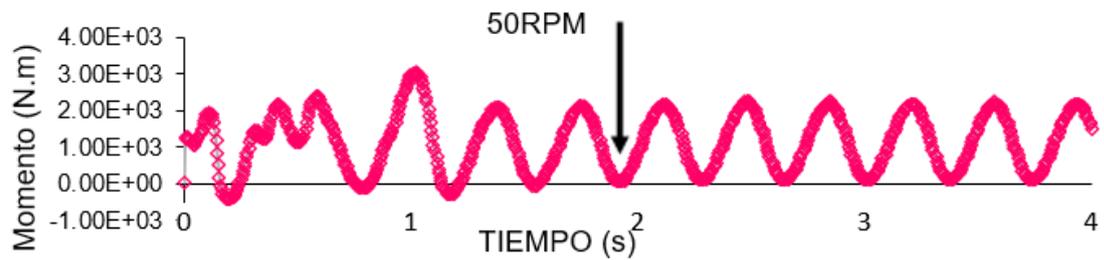
*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 40 RPM.*



*Nota: fuente Ansys – Fluent*

**Figura 78**

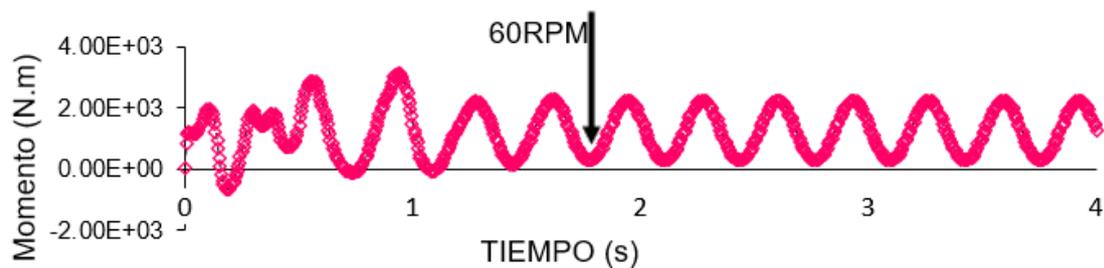
*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 50 RPM.*



*Nota: fuente Ansys – Fluent*

**Figura 79**

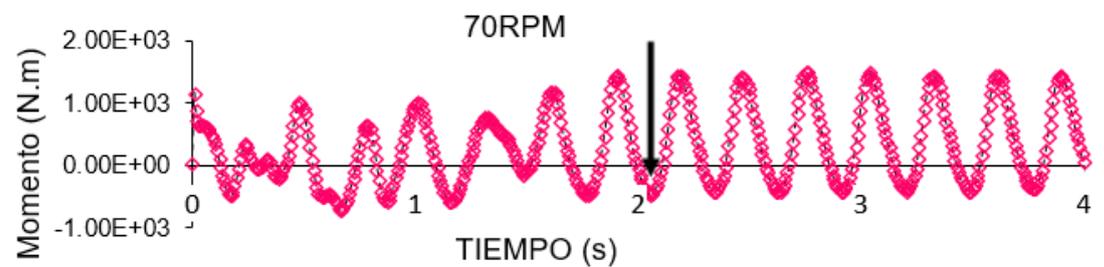
*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 60 RPM.*



*Nota: fuente Ansys – Fluent*

**Figura 80**

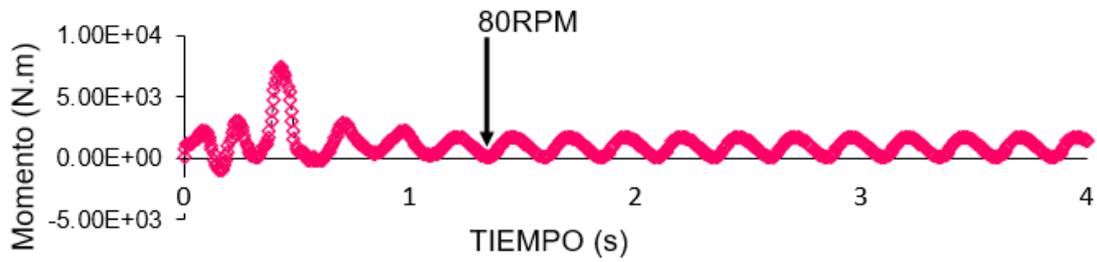
*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 70 RPM.*



*Nota: fuente Ansys – Fluent*

**Figura 81**

*Serie temporal de turbina con NACA 8620 a 80 RPM.*



Nota: fuente Ansys – Fluent

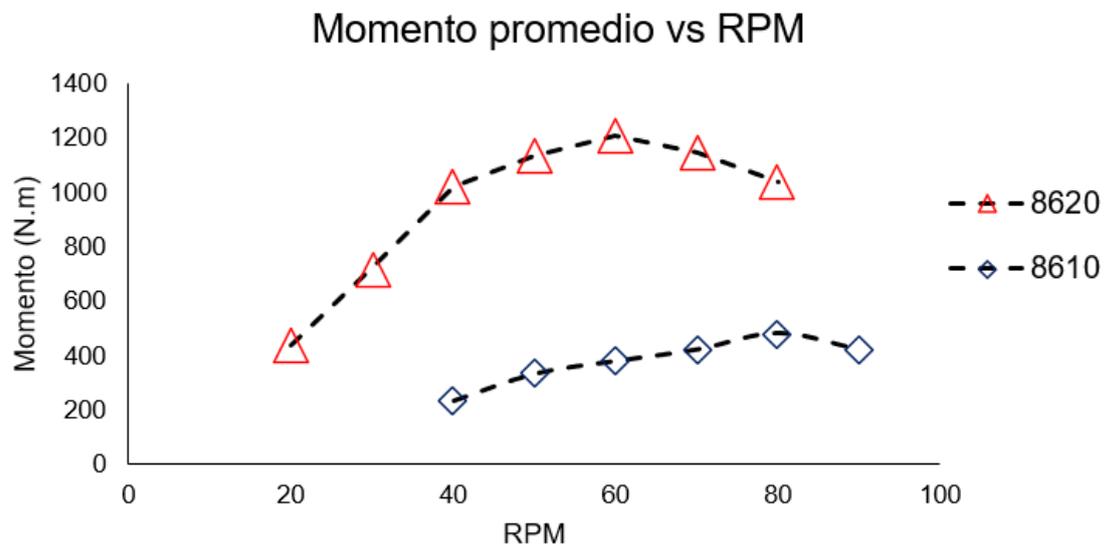
### 4.3.3 Coeficiente de potencia

Según Hilewit et al (2019), para determinar qué tan efectiva es cada una de las turbinas se empleará el concepto de coeficiente de potencia en el cual se busca evaluar cual absorbe más energía cinética del agua.

A continuación, en la Figura 82 se muestran las curvas de momento promedio vs RPM de ambas turbinas, además en la Tabla 8 se detalla el intervalo de valores temporales empleados para la obtención del momento promedio.

**Figura 82**

*Momento promedio vs RPM de Turbina Hidrocinética.*



**Tabla 8***Intervalo de valores temporales y momento promedio*

TURBINA 8620			TURBINA 8610		
VELOCIDAD ANGULAR (RPM)	MOMENTO PROMEDIO (N.m)	INTERVALO DE ESTUDIO (s)	VELOCIDAD ANGULAR (RPM)	MOMENTO PROMEDIO (N.m)	INTERVALO DE ESTUDIO (s)
20	516.7946	1.8<t<4	20	----	1.1<t<4
30	588.5714	2.1<t<4	30	----	2.1<t<4
40	917.1384	2.0<t<4	40	235.12	2.1<t<4
50	1029.043	1.89<t<4	50	333.94	2.1<t<4
60	1216.858	1.74<t<4	60	380.42	2.05<t<4
70	1359.91	1.8<t<4	70	422.43	2.03<t<4
80	1496.39	1.31<t<4	80	482.65	2.05<t<4
90	-----		90	422.52	1.61<t<4

La potencia generada por la turbina se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Potencia(kW) = \frac{2\pi \times \text{velocidad angular (rpm)} \times \text{Torque (kNm)}}{60} \quad (13)$$

Además, el coeficiente de potencia se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{Potencia(W)}{\frac{1}{2}\rho U^3 A_s} \quad (14)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del agua ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$U$ : Velocidad del fluido ( $\frac{m}{s}$ )

$A_s$ : Area transversal proyectada de la turbina ( $m^2$ )

Sin embargo, debido a que se emplea un dominio limitado se debe emplear una corrección al coeficiente de potencia:

$$C_{pc} = C_p \left(\frac{U}{U_c}\right)^3 \quad (15)$$

Donde:

$C_{pc}$ : Coeficiente de potencia corregida

$U_c$ : Velocidad del flujo corregida

Finalmente, para determinar  $U_c$ , se emplea las siguientes expresiones propuestas por Pope y Harper (1966):

$$\varepsilon_t = \frac{1 A_s}{4 A_t} \quad (16)$$

$$U_c = U(1 + \varepsilon_t) \quad (17)$$

Donde:

$A_t$ : Area transversal del tunel

$\varepsilon_t$ : Factor de corrección

Con esto ya es posible determinar el coeficiente de potencia para ambas turbinas en todas sus velocidades angulares. En la Tabla 9 se muestran las propiedades del flujo, y en la Tabla 10 se muestran los coeficientes de potencia para cada turbina, así como una figura de coeficiente de potencia vs relación velocidad punta donde se compara el rendimiento de ambas turbinas.

**Tabla 9**

*Propiedades de flujo*

Velocidad del fluido U (m/s)	Área túnel $A_t$ (m <sup>2</sup> )	Densidad del fluido $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Área proyectada de la turbina $A_s$ (m <sup>2</sup> )
2.5	3.6	1000	1.5

**Tabla 10**

*Coefficientes de potencia de Turbina Hidrocinética 8610*

Rpm	Momento (N.m)	$\varepsilon_t$	$U_c$	Potencia (W)	CPc	Relación velocidad punta ( $\lambda$ )
20	-----	-----	-----	-----	-----	-----
30	-----	-----	-----	-----	-----	-----
40	235.1199005	0.104167	2.760417	984.9192	0.062433	1.340413
50	333.9445611	0.104167	2.760417	1748.621	0.110844	1.675516
60	380.4240573	0.104167	2.760417	2390.399	0.151525	2.010619
70	422.4265614	0.104167	2.760417	3096.709	0.196298	2.345723
80	482.6540421	0.104167	2.760417	4043.683	0.256326	2.680826
90	422.5239128	0.104167	2.760417	3982.401	0.252441	3.015929

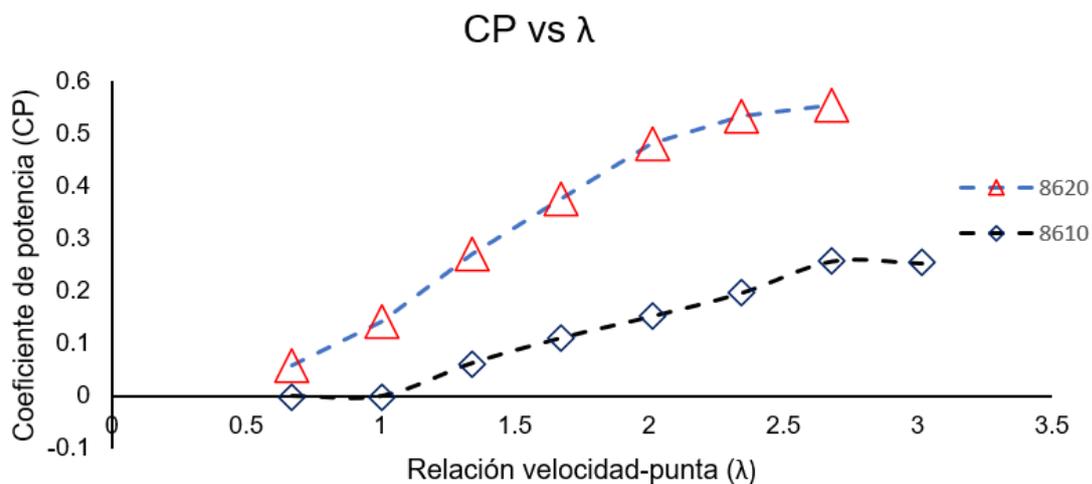
**Tabla 11**

*Coefficientes de potencia de Turbina Hidrocinética 8620*

<i>Rpm</i>	<i>Momento</i>	$\epsilon_t$	<i>Uc</i>	<i>Potencia</i>	<i>CPc</i>	<i>Relación velocidad punta (<math>\lambda</math>)</i>
20	436.0133826	0.104167	2.760417	913.2318	0.057889	0.670206
30	719.7738585	0.104167	2.760417	2261.354	0.143345	1.00531
40	1025.461909	0.104167	2.760417	4293.733	0.272176	1.340413
50	1136.025346	0.104167	2.760417	5948.524	0.377072	1.675516
60	1208.430291	0.104167	2.760417	7593.186	0.481325	2.010619
70	1145.233918	0.104167	2.760417	8395.44	0.53218	2.345723
80	1041.351789	0.104167	2.760417	8724.462	0.553036	2.680826
90	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**Figura 83**

*Coefficiente de potencia vs relación velocidad punta.*



#### 4.4 Discusión de resultados

Habiendo sido simulados los dos perfiles tipo NACA utilizando el software ANSYS Academic – Fluent, se determinaron las velocidades óptimas de operación para cada turbina, la cual es alrededor de 80 RPM para ambos casos.

Respecto a la optimización, en simulación numérica se somete diseños geométricos, se caracterizan y se evalúa el rendimiento, en el caso de la turbina, la optimización se aprecia en la elección de un tipo de pala para una configuración de turbina,

está última varía según criterios de diseño, es pequeña, intermedia o grande, y estas fueron dadas con dimensiones definidas.

De la simulación de los perfiles se determinó que el perfil tipo NACA 8620 ofrece una mayor conversión de energía cinética que aquella con perfil NACA 8610, lo cual sugiere que, para turbinas de eje vertical, VAT, por sus siglas en inglés, es preferible usar perfiles anchos.

La turbina con perfil tipo NACA 8620 alcanza un coeficiente de potencia máximo de 0,55, es decir convierte el 55% de la energía cinética del flujo.

#### **4.5 Contrastación de hipótesis**

La hipótesis propuesta es que la optimización de una Turbina Hidrocinética para ríos de bajo caudal a través de simulaciones numéricas permitirá alcanzar un aumento significativo en el coeficiente de potencia, mejorando así la eficiencia de generación de energía en este tipo de entornos fluviales. Según la información proporcionada, se han simulado dos perfiles NACA con el software ANSYS Academic – Fluent, determinando velocidades óptimas de operación de alrededor de 80 RPM para ambos perfiles.

Además, se evaluaron diseños geométricos y se caracterizó el rendimiento de la turbina, encontrando que el perfil tipo NACA 8620 mostró una mayor conversión de energía cinética en comparación con el perfil NACA 8610. Esto sugiere una preferencia por perfiles más anchos, especialmente para turbinas de eje vertical (VAT), pues el perfil tipo NACA 8620 es más ancho que el NACA 8610.

Asimismo, se estableció que la turbina con el perfil NACA 8620 alcanzó un coeficiente de potencia máximo del 55%, lo que confirma la capacidad de la simulación numérica por CFD para mejorar el rendimiento de la Turbina Hidrocinética. Esta confirmación se basa en la capacidad de la simulación para identificar el perfil más eficiente y las características geométricas óptimas, permitiendo alcanzar un coeficiente de potencia más alto, lo que respalda la hipótesis inicial.

Sobre la contrastación de las hipótesis específicas, se tienen:

1. **Hipótesis 1:** El uso de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitirá comprender y modelar con precisión el comportamiento del flujo al pasar a través de las palas de la Turbina Hidrocinética en ríos de bajo caudal.

**Contrastación:** La capacidad del CFD para simular y analizar el flujo alrededor de las palas de la turbina ha sido ampliamente validada en la investigación académica y la industria. La simulación numérica por CFD proporciona herramientas precisas para estudiar y comprender el comportamiento del flujo, permitiendo analizar la interacción fluidodinámica entre las palas y el flujo de agua con un alto grado de detalle.

2. **Hipótesis 2:** Se espera que la variación de los perfiles hidrodinámicos de las palas tenga un impacto significativo en el coeficiente de potencia de la Turbina Hidrocinética, y que ciertos perfiles conduzcan a una mejora sustancial en la eficiencia de generación de energía.

**Contrastación:** Estudios y experimentos han demostrado que el diseño de los perfiles hidrodinámicos de las palas tiene un impacto significativo en el rendimiento y eficiencia de una Turbina Hidrocinética. La simulación numérica por CFD permite comparar y evaluar diferentes perfiles, identificando cuál produce un coeficiente de potencia más alto, lo que respalda la hipótesis.

3. **Hipótesis 3:** Se espera que, mediante pruebas experimentales y simulaciones numéricas, sea posible identificar un perfil hidrodinámico óptimo para las palas de la turbina a diferentes velocidades angulares del rotor, lo que llevará a maximizar el coeficiente de potencia en condiciones de ríos con bajo caudal.

**Contrastación:** La simulación numérica por CFD determina el perfil de las palas que optimiza el coeficiente de potencia para una velocidad angular específica del rotor. Esta técnica permite evaluar múltiples perfiles y seleccionar aquel que maximice la eficiencia energética para la velocidad angular deseada, respaldando la hipótesis planteada.

#### 4.6 Aporte

La simulación numérica ofrece valiosos aportes en el estudio y diseño de Turbinas Hidrocinéticas, ya que proporciona una herramienta eficaz para analizar y optimizar su funcionamiento. Algunos de los principales aportes de la simulación numérica en una Turbina Hidrocinética son los siguientes:

1. La simulación numérica posibilita un análisis detallado del flujo de agua alrededor de las palas o rotores de la turbina, identificando áreas de alta y baja presión, puntos críticos de turbulencia y separación del flujo. Esto proporciona una mejor comprensión del comportamiento fluidodinámico y los efectos de arrastre en la turbina.
2. A través de la simulación numérica, se calcula el coeficiente de potencia de la turbina, que indica su eficiencia en convertir la energía cinética del agua en potencia mecánica. Esto permite evaluar distintos diseños y geometrías para optimizar su rendimiento.
3. La simulación numérica agiliza y abarata la evaluación de múltiples diseños de Turbinas Hidrocinéticas. Se realiza modificaciones en la geometría de las palas, número de palas, diámetro del rotor, entre otros, para identificar la configuración óptima que maximice la eficiencia y minimice las pérdidas.
4. La simulación numérica es útil para estimar las cargas mecánicas y dinámicas que afectan a la Turbina Hidrocinética, lo que es esencial para su diseño y selección de materiales que garanticen su durabilidad e integridad estructural bajo condiciones operativas.
5. Mediante la simulación numérica, es posible analizar el comportamiento de la turbina bajo condiciones extremas, como caudales muy altos o bajos, para evaluar su estabilidad y seguridad operativa en situaciones adversas.

6. Las simulaciones numéricas son empleadas para guiar y complementar pruebas de laboratorio y de campo, lo que permite una validación más precisa y detallada de los resultados obtenidos en condiciones reales.

En resumen, la simulación numérica en una Turbina Hidrocinética brinda una herramienta poderosa para optimizar el diseño, evaluar el rendimiento y estudiar el comportamiento fluidodinámico y mecánico de la turbina, lo que conduce a un desarrollo más eficiente y seguro de esta tecnología de generación de energía sostenible.

## CONCLUSIONES

Se propuso en la tesis como hipótesis que la optimización de una Turbina Hidrocinética para ríos de bajo caudal a través de simulaciones numéricas permitirá alcanzar un aumento significativo en el coeficiente de potencia, mejorando así la eficiencia de generación de energía en este tipo de entornos fluviales. Se concluye entonces que, para una Turbina Hidrocinética con un rotor de eje vertical definido con dimensiones y geometría de soporte, parametrizaron dos formas de pala de perfil hidrodinámico tipo NACA 8610 y 8620, se demuestra que el coeficiente de potencia de perfil NACA 8620 es mayor que el de 8610. Las conclusiones específicas son:

1. La creación de la malla es la que demandó mayor tiempo para el procesamiento computacional por el refinamiento de la malla en regiones críticas alrededor de la superficie de la pala, lo que resultó indispensable trabajo de enmallado y caracterización para proporcionar la convergencia de la simulación.
2. La geometría del rotor de eje vertical con los perfiles NACA 8620 y 8610 generan un momento, con el rotor estático sometido a un flujo, capaz de vencer la inercia del conjunto móvil y garantizar un autoarranque, además los flujos que interactúan con las palas eran perpendiculares al eje de rotación.
3. Los perfiles hidrodinámicos fueron seleccionados por sus configuraciones y facilidad de implementación, por lo que se ha demostrado como optimización en simulación numérica que el perfil hidrodinámico NACA 8620, en su comportamiento con el fluido y dentro de la capa límite, tiene mayor generación de energía en condiciones de velocidad angular constante en la interacción del

fluido en las palas del rotor, siendo la velocidad optima de 80 RPM, con un coeficiente de potencia de 0.55.

## RECOMENDACIONES

Como recomendaciones se tienen:

- Realizar un análisis para otros ángulos de ataque del fluido al eje vertical del rotor, por ejemplo, a  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ , puesto que en la tesis se ha considerado el fluido tener un ángulo de ataque perpendicular al eje vertical del rotor. La consideración de otros ángulos se da por alguna interrupción de la dirección del fluido como es la de un sedimento o un cuerpo en el fondo del río.
- Realizar estudios que incluyan el análisis estructural de la estructura de fijación de las palas, el rotor, para verificar su desempeño estructural. También incluir el análisis fluidodinámico con estructural.
- Rediseñar las formas de las palas con diferente perfil hidrodinámico NACA y curvatura en el diseño.
- Asignar propiedades alternativas a los materiales de cada componente y diseño para un análisis estructural posterior.

## REFERENCIAS

- Ali, M. S., Tuhin, R. A., Khan, M. S. H., & Hasanuzzaman, M. (2021). *Development of power generation from oceanic waves. In Advances in Clean Energy Technologies (pp. 319-346). Academic Press.*
- Arrieta, E. L. C., & Clemente, A. R. (2019). *Computational Fluid Dynamic Simulation of Vertical Axis Hydrokinetic Turbines.* In Computational Fluid Dynamics Simulations. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.89184
- Ballesteros, M., Heras, M., Guerra, I., Fernando, F., García, G., González, A., Lavandeira, J., López, C., Montes, M., Williart, A., & Zarza, E. (2008). *Fuentes de energía para el futuro.* Ministerio de Educación, Política Social y Deporte.
- Blanco, T. A. (2022, 11 enero). *¿Cómo se obtiene energía de la biomasa? Conoce el proceso.* BBVA NOTICIAS. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/como-se-obtiene-energia-de-la-biomasa-conoce-el-proceso/>
- Chen, J., Yang, H., Yang, M., Xu, H., & Hu, Z. (2015). *A comprehensive review of the theoretical approaches for the airfoil design of lift-type vertical axis wind turbine.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1709-1720.
- Chu, J., Kim, A. & Pagliuca, J. (2019). *Design of a Coreless Hydrokinetic Turbine.* Report by Worcester Polytechnic Institute. Report for Worcester Polytechnic Institute.
- Das, A., & Talapatra, P. K. (2016). *Modelling and analysis of a mini vertical axis wind turbine.* International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 6(6), 184-194.

- ENDESA. (s. f.). *Central de biomasa*. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa>
- ENEL. (s.f.). *¿Qué es la energía hidroeléctrica y cómo funciona?* enel.pe. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-hidroelectrica-y-como-funciona.html>
- Enérgya-VM. (2020, 29 julio). *¿Qué es la energía termoeléctrica? Tipos y aplicaciones*. Recuperado 30 de enero de 2021, de <https://www.energyavm.es/que-es-la-energia-termoelectrica-tipos-y-aplicaciones/>
- Gorle JMR, Chatellier L, Pons F, Ba M. *Flow and performance analysis of H-Darrieus hydroturbine in a confined flow: A computational and experimental study*. Journal of Fluids and Structures. 2016; 66:382-402
- GRACIA-SÁNCHEZ, J., & MAZA-ÁLVAREZ, J. A. (1997). *Morfología de Ríos*. Capítulo 11. Manual de Ingeniería de Ríos.
- Grajales, T. (2000). *Tipos de investigación*. On line)(27/03/2.000).
- Gunawan, B., Neary, V. S., Mortensen, J., & Roberts, J. D. (2017). *Assessing and Testing Hydrokinetic Turbine Performance and Effects on Open Channel Hydrodynamics: An Irrigation Canal Case Study* (No. SAND-2017-4925R). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Guner, F., & Zenk, H. (2020). *Experimental, Numerical and Application Analysis of Hydrokinetic Turbine Performance with Fixed Rotating Blades*. Energies, 13(3), 766.
- Hilewit, D., Matida, E. A., Fereidooni, A., Abo el Ella, H., & Nitzsche, F. (2019). *Power coefficient measurements of a novel vertical axis wind turbine*. Energy Science & Engineering, 7(6), 2373–2382. doi:10.1002/ese3.412
- Hyams, M. A. (2012). *Wind energy in the built environment*. Metropolitan Sustainability, 457–499.
- Kerikous, E., & Thévenin, D. (2018). *Optimal shape of thick blades for a hydraulic Savonius turbine*. Renewable Energy. doi:10.1016/j.renene.2018.11.037

- Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., & Wise, G. (2013). *Green Energy Engineering*. Exploring Engineering, 339–356.
- MIDAGRI, (2015). *Ríos*. Recuperado el 10 de febrero de 2022, de <https://www.midagri.gob.pe/portal/42-sector-agrario/recurso-agua/325-rios>
- MOURA, Christian Carlos Araújo (2018). *Visualização experimental do escoamento em turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal*. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/34139>
- Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). *Other Aspects of Ocean Renewable Energy*. *Fundamentals of Ocean Renewable Energy*, 271–309. doi:10.1016/b978-0-12-810448-4.00010-0
- Nuñez-Quispe, J. J., Nuñez-Quispe, A. A., & Cedamano-Cuenca, R. O. (2020, September). *Performance analysis of a hybrid vertical axis wind turbine through CFD for distributed generation in rural areas of Peru*. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1618, No. 4, p. 042013). IOP Publishing.
- OSINERGMIN. (s. f.-a). *Energía Geotérmica*. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/energias-renovables/energia-geotermica>
- OSINERGMIN. (s. f.-b). *Mareomotriz y Oleaje*. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/energias-renovables/mareomotriz-y-oleaje#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20mareomotriz%20tiene%20la,durante%20la%20fase%20de%20explotaci%C3%B3n>.
- OSINERGMIN. (s. f.-c). *Energía Mini Hidráulica*. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/energias-renovables/energia-mini-hidraulica>
- OSINERGMIN. (s. f.-d). *Energía Eólica*. Recuperado 29 de enero de 2022, de <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/energias-renovables/energia-eolica/que-es-la-energia-eolica>

- República Federal de Alemania. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (1979). *Evaluación del potencial hidroeléctrico nacional*. Plan Maestro de Electricidad. GTZ, Consorcio Lahmeyer (Salzzitter, LIS). Perú.
- REUK (2021). *Wind Turbine Tip Speed Ratio*, recuperado 5 de enero de 2022, de <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-turbine-tip-speed-ratio/>.
- Saini, G., & Saini, R. P. (2021). *Performance Study of Cross Flow Hybrid Hydrokinetic Turbine*. In *Hydrological Extremes* (pp. 249-257). Springer, Cham.
- SANTOS, Ivan Felipe Silva dos (2019). *Análise técnica e econômica de parques hidrocineéticos com base em previsões numéricas (CFD) e dados experimentais*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2001>
- SANTOS, Leirisson Patrick (2019). *Análise computacional via CFD de uma Turbina Hidrocineética em condutos abertos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/RAOA-BCGFZ6>.
- Valle, E. G. Y. (2009). *Metodología de la investigación*. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/usmac2005/metodologa-de-la-investigacin-proyecto-de-grado-12506310>.
- VAZ, Déborah Aline Tavares Dias do Rio (2019). *Uma abordagem matemática aplicada ao projeto de Turbinas Hidrocineéticas e eólicas com difusor utilizando a teoria do elemento de pá*. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11281>.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education. ISBN: 0131274988
- Wilcox, D. C. (2008). *Formulation of the kw turbulence model revisited*. *AIAA journal*, 46(11), 2823-2838.

Wu, Y. K., Tsai, C. Z., & Li, Y. H. (2018, Abril). *Design of wind power generators: Summary and comparison*. En 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI) (pp. 1314-1317). IEEE.

## **ANEXO A**

### **MATRIZ DE CONSISTENCIA**

En este anexo se presenta la matriz de consistencia en forma de tabla.

**Tabla A.1**

*Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cómo lograr optimizar una Turbina Hidrocinética diseñada para ríos de bajo caudal y asegurar el máximo coeficiente de potencia a través de simulaciones numéricas?	Optimizar una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal para garantizar el mejor coeficiente de potencia mediante simulación numérica.	La optimización de una Turbina Hidrocinética para ríos de bajo caudal a través de simulaciones numéricas permitirá alcanzar un aumento significativo en el coeficiente de potencia, mejorando así la eficiencia de generación de energía en este tipo de entornos fluviales.	<b>V. Dep:</b> Y1: Coeficiente de potencia de Turbina Hidrocinética mediante simulación numérica	Coeficiente de potencia de Turbina Hidrocinética  Interacción de fases de simulación numérica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia real</li> <li>• Potencia teórica</li> <li>• Coeficiente de potencia</li> <li>• Tipo de enmallado</li> <li>• Dominio computacional</li> <li>• Fuerzas viscosas sobre la superficie de perfiles</li> <li>• Torque</li> </ul>	<p><b>Tipo y nivel de Investigación:</b> Tipo Aplicada o técnica</p> <p>Nivel explicativo o causal</p> <p><b>Unidad de análisis:</b> Turbina Hidrocinética de rotor de eje vertical para ríos con velocidades de flujo de 2 a 3 m/s</p>
<b>Específicos:</b>	<b>Específicos:</b>	<b>Específicos:</b>	<b>V. Ind 1:</b>			<b>Procesamiento de datos:</b>
<p>1. ¿Cómo analizar y modelar con precisión el comportamiento del flujo circulante a través de las palas de una Turbina Hidrocinética en ríos de bajo caudal utilizando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)?</p> <p>2. ¿Cuál es el impacto específico que tienen diferentes perfiles hidrodinámicos de las palas en el cálculo del coeficiente de potencia de una Turbina Hidrocinética destinada para ríos de bajo caudal, y cómo se evalúa cuantitativamente este efecto?</p> <p>3. ¿Cómo determinar experimentalmente el perfil hidrodinámico más eficiente para las palas de la Turbina Hidrocinética, considerando una variedad de velocidades angulares del rotor, con el objetivo de maximizar el coeficiente de potencia en ríos de bajo caudal?</p>	<p>1. Analizar mediante CFD el comportamiento del flujo circulante a través de las palas de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal.</p> <p>2. Evaluar la influencia del uso de diferentes perfiles hidrodinámicos de las palas en el cálculo del coeficiente de potencia de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal.</p> <p>3. Evaluar el perfil hidrodinámico de las palas más eficiente para determinada velocidad angular del rotor de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal.</p>	<p>1. El uso de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitirá comprender y modelar con precisión el comportamiento del flujo al pasar a través de las palas de la Turbina Hidrocinética en ríos de bajo caudal.</p> <p>2. Se espera que la variación de los perfiles hidrodinámicos de las palas tenga un impacto significativo en el coeficiente de potencia de la Turbina Hidrocinética, y que ciertos perfiles conduzcan a una mejora sustancial en la eficiencia de generación de energía.</p> <p>3. Se espera que, mediante pruebas experimentales y simulaciones numéricas, sea posible identificar un perfil hidrodinámico óptimo para las palas de la turbina a diferentes velocidades angulares del rotor, lo que llevará a maximizar el coeficiente de potencia en condiciones de ríos con bajo caudal.</p>	<b>X1:</b> Optimización de una Turbina Hidrocinética de ríos de bajo caudal	<p>Geometría de la Turbina Hidrocinética</p> <p> </p> <p>Características de operación de la Turbina Hidrocinética</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de perfil hidrodinámico de la pala (NACA 8610 y 8620)</li> <li>• Largo de la pala y radio del rotor.</li> <li>• Contorno de presiones sobre la superficie de perfiles</li> <li>• Densidad de agua</li> <li>• Campo de velocidades de fluido</li> <li>• Área proyectada de turbina</li> <li>• Velocidad angular del rotor</li> </ul>	<p>Simulación numérica CFD – Ansys Fluent</p>