

Universidad Nacional de Ingeniería
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIDAD DE POSGRADO



TESIS:

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE UNA MICRO TURBINA KAPLAN PARA
OPTIMIZAR EL COEFICIENTE DE POTENCIA**

ELABORADO POR:

FLORA MARIBEL FERNÁNDEZ RENGIFO

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

ASESOR:

MSC. JUSTO REYNALDO VILLANUEVA URE

LIMA, PERÚ

2025

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis hijos, Diego y Sofía, quienes con su amor iluminan cada uno de mis días y me enseñan, con su ternura y alegría, a nunca rendirme.

A mis padres, Eusebio y Asunciona, por ser el ejemplo vivo de entrega, trabajo honesto y amor incondicional. Y de manera especial, a Urbano, por su apoyo constante y silencioso, por caminar a mi lado con firmeza y paciencia. Su presencia ha sido un pilar fundamental en este logro.

Este triunfo no es solo mío: es de todos los que caminaron conmigo, creyeron en mí y nunca soltaron mi mano.

Maribel Fernández

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi asesor por su valiosa guía y constante apoyo durante el desarrollo de esta tesis. A la Universidad Nacional de Ingeniería, al programa CARELEC y a la Biblioteca Central UNI, por los recursos y oportunidades brindadas, esenciales para este trabajo.

Expreso también mi gratitud a mis amigos, colegas y compañeros, cuya inspiración y respaldo fueron siempre significativos, y, de manera muy especial, a mi familia, por su presencia constante, comprensión y amor.

Finalmente, agradezco a Dios, por darme la fuerza y las oportunidades para alcanzar este logro.

RESUMEN

Esta investigación se centra en el análisis numérico de una Micro Turbina Kaplan diseñada para ríos de bajo caudal mediante simulaciones numéricas avanzadas para verificar un óptimo coeficiente de potencia. El objetivo principal es analizar numéricamente una Micro Turbina Kaplan respecto a su coeficiente de potencia, utilizando herramientas como ANSYS BladeGen y CFX. El estudio incluyó el diseño geométrico del rodete y los álabes, la generación de un mallado tridimensional y la simulación del flujo bajo diferentes condiciones operativas. Los resultados muestran que el coeficiente de potencia (C_P) alcanza un valor máximo de 0.616 a una altura de caída de 2.0 metros, confirmando la eficiencia del diseño en escenarios de bajo caudal. Asimismo, la simulación permitió identificar la influencia de parámetros clave, como la velocidad del flujo y la distribución de presiones, en el rendimiento global de la turbina. Estas evaluaciones validan el diseño propuesto y destacan la relevancia de ajustar las condiciones hidráulicas para maximizar la eficiencia energética. Los hallazgos contribuyen al desarrollo de tecnologías hidrocínéticas sostenibles y adaptables a comunidades rurales, promoviendo el aprovechamiento responsable de recursos hídricos limitados. Este trabajo establece un marco metodológico replicable para futuros estudios y aplicaciones prácticas en sistemas hidroeléctricos de baja escala.

Palabras Clave: Micro Turbina Kaplan, coeficiente de potencia, dinámica de fluidos computacional y energía hidrocínética.

ABSTRACT

This research focuses on the numerical analysis of a Micro Kaplan Turbine designed for low-flow rivers through advanced numerical simulations to verify an optimal power coefficient. The main objective is to numerically analyze a Micro Kaplan Turbine concerning its power coefficient using tools such as ANSYS BladeGen and CFX. The study included the geometric design of the runner and blades, the generation of a three-dimensional mesh, and the simulation of fluid flow under different operating conditions. The results show that the power coefficient (CP) reaches a maximum value of 0.616 at a head height of 2.0 meters, confirming the design's efficiency in low-flow scenarios. Additionally, the simulation identified the influence of key parameters, such as flow velocity and pressure distribution, on the turbine's overall performance. These evaluations validate the proposed design and highlight the importance of adjusting hydraulic conditions to maximize energy efficiency. The findings contribute to the development of sustainable hydrokinetic technologies adaptable to rural communities, promoting the responsible use of limited water resources. This work establishes a replicable methodological framework for future studies and practical applications in small-scale hydropower systems.

Keywords: Micro Kaplan Turbine, power coefficient, computational fluid dynamics, hydrokinetic energy.

ÍNDICE

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS	1
1.1 Antecedentes de la investigación.....	1
1.1.1 Antecedentes internacionales	1
1.1.2 Antecedentes nacionales.....	5
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio	10
1.3 Formulación del problema	13
1.3.1 Problema General	13
1.3.2 Problemas Específicos	14
1.4 Justificación e importancia	14
1.4.1 Justificación Técnica.....	14
1.4.2 Justificación Económica	15
1.4.3 Justificación Ambiental	15
1.4.4 Justificación Social	16
1.4.5 Importancia Académica y Científica	16
1.4.6 Relevancia Estratégica	17
1.5 Objetivos	17
1.5.1 Objetivo General.....	17
1.5.2 Objetivo Específico	18
1.6 Hipótesis	18
1.6.1 Hipótesis General	18
1.6.2 Hipótesis Específicas.....	18
1.7 Variables, dimensiones e indicadores.....	19

1.8	Unidad de análisis	21
1.9	Fuentes de información	21
1.10	Tipo y nivel de investigación	22
1.10.1	Tipo de investigación.....	22
1.10.2	Nivel de investigación.....	22
1.11	Método de diseño de la investigación	23
1.12	Población y muestra	24
1.12.1	Población	24
1.12.2	Muestra	24
1.13	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	25
1.13.1	Técnicas:.....	25
1.13.2	Instrumentos:	25
1.14	Análisis y procesamiento de datos.....	26
1.14.1	Etapas del Análisis y Procesamiento:.....	26
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL		29
2.1	Teoría de turbomáquinas.....	29
2.1.1	Triángulo de velocidades	29
2.1.2	Ecuación fundamental de las turbomáquinas	30
2.1.3	Teoría de persianas de álabes.....	32
2.2	Turbina	33
2.2.1	Partes de una turbina hidráulica	34
2.2.1	Clasificación de turbinas hidráulicas	36
2.3	Turbina Kaplan	39
2.3.1	Clasificación de turbinas tipo Kaplan	41
2.3.2	Paletas guía de una Turbina Kaplan.....	43
2.3.3	Extracción de energía a través de un rotor Kaplan	44
2.3.4	Mecanismo de regulación en las turbinas Kaplan	45
2.3.5	Importancia de las turbinas Kaplan.....	47

2.4	Dinámica de fluidos computacional (CFD)	48
2.4.1	Aplicaciones de la CFD	50
2.4.2	Fases para resolver un problema en CFD	51
2.5	Ríos	54
2.5.1	Cuenca hidrográfica.....	56
2.6	Marco Conceptual: Definición de términos o conceptos	58
2.6.1	Turbina Kaplan	58
2.6.2	Dinámica de fluidos computacional.....	59
2.6.3	Caudal	59
2.6.4	Simulación numérica	59
2.6.5	Mallado en CFD.....	59
2.6.6	Regulación de los álabes en turbinas Kaplan	60
2.6.7	Turbina de hélice	60
2.6.8	Turbina de bulbo.....	60
2.6.9	Turbina Francis.....	60
2.6.10	Turbina Pelton	61
	CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA TESIS	62
3.1	Configuración Geométrica con ANSYS BladeGen	64
3.2	Diseño y simulación de la Micro Turbina Kaplan.....	66
3.2.1	Flujo de Trabajo en ANSYS Workbench	67
3.2.2	Configuración de la Simulación	68
3.2.3	Resultados Esperados.....	68
3.3	Modelado del Rodete.....	69
3.3.1	Parámetros Introducidos.....	69
3.3.2	Configuración del Modelo	70
3.4	Modificación de la geometría del Rodete	72
3.4.1	Ajustes Realizados	72
3.5	Enmallado del modelo de Micro Turbina Kaplan	76

3.5.1 Ventajas de TurboGrid.....	77
3.5.2 Características de la Malla Generada.....	78
3.5.3 Alternativas de Mallado	79
3.6 Generación de la malla tridimensional	80
3.6.1 Procedimiento para Generar la Malla 3D	81
3.6.2 Gestión de Errores en Mesh Data.....	81
3.6.3 Validación de la Malla.....	82
3.6.4 Distribución y Propiedades del Mallado	84
3.7 Configuración y simulación en ANSYS CFX	85
3.7.1 Configuración General del Solver en CFX	85
3.7.2 Configuración del Modelo de Turbulencia.....	86
3.7.3 Condiciones de Frontera	88
3.7.4 Simulación y Análisis de Resultados	89
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	91
4.1 Condiciones de Frontera y Cálculo del Coeficiente de Potencia	91
4.1.1 Interpretación de Resultados	91
4.1.2 Consolidado de Resultados	92
4.2 Discusión de resultados.....	94
4.3 Contrastación de hipótesis.....	96
4.4 Aporte	98
CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES.....	102
REFERENCIAS	103
ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Componentes de la velocidad y ángulos significativos en una Turbina hidráulica	30
Figura 2	Persianas de álabes	33
Figura 3	Eficiencia de las turbinas en relación con las fluctuaciones del flujo de agua	34
Figura 4	Partes de una turbina hidráulica	36
Figura 5	Clasificación de turbinas hidráulicas por la variación de presión.....	36
Figura 6	Clasificación de turbinas hidráulicas por la dirección del agua.....	37
Figura 7	Aplicación de diferentes turbinas	38
Figura 8	Rendimientos de diferentes turbinas en función del flujo aplicado	39
Figura 9	Elementos clave de la Turbina Kaplan.....	40
Figura 10	Esquema de la rueda del rotor y las paletas guía de una Turbina Kaplan.....	41
Figura 11	Partes de la turbina semi-Kaplan	42
Figura 12	Diagrama esquemático que muestra la disposición de las palas del rotor y las paletas guía	43
Figura 13	Velocidades y fuerzas en un ángulo de la paleta del rodete de una Turbina Kaplan	44
Figura 14	Mecanismo de regulación de las palas de una Turbina Kaplan	46
Figura 15	Disposición del cubo y la pala (Kaplan)	47
Figura 16	Aplicación de la dinámica de fluidos computacional.....	51
Figura 17	Resultado de post-procesamiento de un programa de CFD comercial	53
Figura 18	Dimensiones de la conectividad de un río.....	54
Figura 19	Perfil longitudinal de un río	56
Figura 20	Partes de una cuenca hidrográfica	57
Figura 21	Diagrama de flujo del proceso de simulación.....	63

Figura 22	Configuración inicial del modelo 3D de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen	64
Figura 23	Renderizado 3D de los álabes de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen	65
Figura 24	Vista de corte y dimensiones de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen	65
Figura 25	Vista de planta y dimensiones de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen.....	66
Figura 26	Configuración inicial del modelo del rodete en BladeGen	71
Figura 27	Propiedades del modelo generado en BladeGen.....	71
Figura 28	Forma transversal del Shroud, destacando su influencia en la dirección y uniformidad del flujo.....	72
Figura 29	Configuración del número de álabes en la interfaz de BladeGen.....	73
Figura 30	Perfil líder del álabe	74
Figura 31	Perfil medio del álabe	74
Figura 32	Perfil final del álabe	75
Figura 33	Configuración inicial para la simulación en TurboGrid	77
Figura 34	Región equivalente seleccionada para optimizar la simulación.....	78
Figura 35	Vista detallada de la malla generada con Mesh.....	80
Figura 36	Configuración del Size Factor en Mesh Data	82
Figura 37	Distribución del enmallado en 3D Mesh.....	83
Figura 38	Detalles del generador Mesh.....	83
Figura 39	Estadísticas del Mesh.....	84
Figura 40	Dominio de la Micro Turbina Kaplan	86
Figura 41	Configuración de las condiciones de frontera	89
Figura 42	Interacción del flujo de corriente con los álabes de la Micro Turbina Kaplan	92
Figura 43	Condiciones de operación de minicentral eléctrica con Micro Turbina Kaplan	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	20
Tabla 2 Puntos de control definidos para el Hub y el Shroud en BladeGen	75
Tabla 3 Resumen de la Configuración de la simulación - 1.....	88
Tabla 4 Resumen de la Configuración de la simulación - 2.....	93

INTRODUCCIÓN

Esta tesis aborda el análisis y optimización de una Micro Turbina Kaplan diseñada específicamente para operar en ríos de bajo caudal, utilizando herramientas de simulación numérica avanzada. El objetivo principal es optimizar el coeficiente de potencia, maximizando la conversión de energía hidráulica en energía mecánica, respondiendo a la creciente necesidad de soluciones tecnológicas sostenibles en el ámbito de la generación de energía renovable. Este enfoque es particularmente relevante en escenarios donde los recursos hídricos son limitados y se requiere un diseño adaptado para su aprovechamiento óptimo.

La estructura de la investigación se organiza en cuatro capítulos principales, además de las conclusiones y recomendaciones, los cuales se describen a continuación:

- El Capítulo 1, "Aspectos generales y metodológicos", introduce los fundamentos del estudio, incluyendo los antecedentes internacionales y nacionales que respaldan la investigación, la identificación del problema y su formulación, así como la justificación del trabajo desde los ámbitos técnico, económico, social y ambiental. Asimismo, se detallan los objetivos, hipótesis, variables, métodos de diseño y las herramientas empleadas para la recopilación y análisis de datos.
- El Capítulo 2, "Marco Teórico y Conceptual", proporciona una base teórica sólida para la investigación. Se exploran conceptos fundamentales de las turbomáquinas, los principios operativos y las características particulares de las Turbinas Kaplan, junto con el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) como herramienta para evaluar y optimizar su rendimiento. Además, se

presentan definiciones relacionadas con el flujo hidráulico, el triángulo de velocidades, el enmallado y la regulación de álabes en turbinas hidráulicas.

- El Capítulo 3, "Desarrollo de la Tesis", describe detalladamente el proceso de diseño, modelado y simulación de la Micro Turbina Kaplan. Este capítulo incluye la Configuración geométrica de la turbina, los parámetros de análisis seleccionados y las condiciones de contorno aplicadas en las simulaciones numéricas. También se detallan los procedimientos técnicos para la generación del modelo computacional y el análisis de las interacciones entre el flujo y los componentes de la turbina.
- El Capítulo 4, "Análisis de resultados y contrastación de hipótesis", presenta los hallazgos obtenidos a partir de las simulaciones numéricas y su interpretación en relación con los objetivos e hipótesis planteados. Además, se discuten los aportes más relevantes de la investigación en términos de diseño tecnológico, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental.

Por último, las conclusiones resumen los logros del estudio, destacando las implicaciones prácticas y científicas de los resultados obtenidos, mientras que las recomendaciones proponen posibles líneas de investigación y aplicación futura, contribuyendo al desarrollo de tecnologías innovadoras para la generación de energía limpia en ríos de bajo caudal. Este trabajo pretende ser un aporte significativo al aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos y a la transición hacia fuentes de energía renovable.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS

El primer capítulo establece las bases conceptuales y metodológicas de la investigación, proporcionando un marco integral que guía el desarrollo del estudio. En este apartado se presentan los antecedentes internacionales y nacionales que sustentan la relevancia del tema, así como la identificación del problema de estudio, su formulación, y las justificaciones técnica, económica, ambiental, social y académica. Además, se definen los objetivos, hipótesis y variables, acompañados de sus dimensiones e indicadores. Finalmente, se describe el tipo, nivel, método, y diseño de la investigación, junto con las técnicas e instrumentos de recolección y procesamiento de datos.

1.1 Antecedentes de la investigación

1.1.1 Antecedentes internacionales

(Chavarro Lara, 2019), en su trabajo de grado, modeló y simuló una turbina de reacción Kaplan para evaluar su desempeño en la generación de energía eléctrica, especialmente en contextos de altos caudales y bajas cabezas, donde esta turbina tiene menor participación. La metodología del estudio incluyó la modelación de la geometría de la turbina en Autodesk Inventor y la realización de simulaciones de mecánica de fluidos computacional (CFD) en STAR-CCM+, utilizando el modelo de turbulencia $k-\omega$. Se analizaron datos relacionados con la cabeza, presiones, velocidades, potencias y eficiencia del agua a 20°C. Además, se comparó el desempeño de la Turbina Kaplan con una bomba axial empleada como turbina (BCT) en microcentrales hidroeléctricas de 10 kW. Los resultados mostraron que la Turbina Kaplan alcanzó una eficiencia máxima del 56% a 1000

rpm y un caudal de 210 L/s, generando 10 kW con una cabeza de 8,4 m. Su desempeño fue equivalente al de una bomba axial estándar utilizada como turbina, sugiriendo que esta última podría ser una alternativa de bajo costo para experimentaciones. En conclusión, no se presentó cavitación en la Turbina Kaplan, ya que la presión del agua no descendió por debajo de su presión de vapor, evitando así efectos de erosión y golpeteo en sus componentes.

(Abeykoon, 2022), en su artículo, investigó los enfoques de diseño y optimización para la rueda motriz de una Turbina Kaplan, clave en la eficiencia de las turbinas hidroeléctricas. Inicialmente, se realizó un diseño teórico detallado para definir las características principales de la rueda motriz, obteniendo una eficiencia teórica de alrededor del 94%. Sin embargo, al implementar este diseño en una plataforma de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) en ANSYS, la eficiencia alcanzada fue solo del 59.98%, evidenciando que los cálculos teóricos, basados en numerosas suposiciones simplificadoras, solo proporcionaban una solución aproximada. Posteriormente, se utilizó CFD para analizar y modificar el diseño teórico, evaluando los efectos de las velocidades tangenciales de entrada y salida de las palas, la distribución de la presión a través de la rueda motriz y el número de palas. Las modificaciones cuidadosamente realizadas permitieron optimizar la rueda motriz, logrando una eficiencia del 93.01%. Los ángulos de entrada y salida de las palas demostraron tener un impacto significativo en el rendimiento de generación de energía de la Turbina Kaplan. En cuanto a los resultados, se observó que ajustar los ángulos de entrada y salida mejoraba sustancialmente la eficiencia de extracción de energía, incrementándola hasta en un 42.03%. Además, se analizó el efecto del número de palas, encontrando que cuatro palas proporcionaban la mejor eficiencia, lo cual coincidía con estudios previos. Finalmente, concluyó que, aunque los cálculos teóricos son un paso inicial valioso en el diseño, es crucial utilizar simulaciones CFD para refinar y optimizar los diseños de turbinas. Este estudio proporciona una visión amplia y detallada del diseño y optimización de la rueda

motriz de una Turbina Kaplan, contribuyendo significativamente al conocimiento existente y siendo útil para el diseño de otros tipos de turbinas hidráulicas.

(Mehr et al., 2021), en su artículo, desarrollaron una nueva metodología para diseñar y optimizar turbinas hidráulicas de flujo transversal en diversas condiciones operativas. En la fase de diseño a nivel de sistema, utilizaron la altura del agua y el caudal para determinar el diámetro del rotor y seleccionar los parámetros iniciales de la turbina. La fase de diseño detallado se llevó a cabo en tres pasos: primero, se diseñó la geometría de la boquilla para lograr perfiles de velocidad y ángulo de ataque uniformes en la entrada del rotor; segundo, se optimizaron los parámetros del rotor mediante análisis numéricos sucesivos para comprender su efecto en el rendimiento de la turbina y seleccionar los valores óptimos; y tercero, se mejoró el rendimiento de la turbina evaluando su desempeño bajo varias condiciones de carga y ajustando la geometría según fuera necesario. Este proceso de diseño detallado se basó en simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics) utilizando ANSYS®. Los resultados mostraron que la turbina diseñada utilizando esta metodología logró una eficiencia hidráulica máxima del 91% y una eficiencia total máxima del 82%, manteniendo un buen rendimiento incluso con caudales tan bajos como el 14% del valor nominal y variaciones de altura del agua de hasta el 30% del valor nominal. Además, se observó que la eficiencia de la turbina era parabólica en función de la relación de velocidad, alcanzando su máximo para relaciones de velocidad entre 0.9 y 1. También se destacó que la presión estática relativa del agua que entra en el rotor es significativamente mayor que cero debido a la fuerza centrífuga impuesta por la rotación del rotor. En las conclusiones, se determinó que la metodología propuesta proporciona un proceso rápido y computacionalmente eficiente para diseñar turbinas de alta eficiencia. Además, se realizaron varias observaciones sobre las características de la turbina: la curva de la boquilla debajo del álabe guía y al final de la boquilla son lineales en términos de ángulo polar; el ángulo de admisión óptimo debe equilibrar la captación de agua y la presión estática relativa; y el perfil de los álabes debe minimizar la resistencia a los flujos entrantes y salientes.

(Iovănel et al., 2022), en su artículo, investigaron el comportamiento de un prototipo de Turbina Kaplan de 10 MW durante la operación sin carga a velocidad (SNL), una de las condiciones más perjudiciales para las turbinas hidráulicas debido a las inestabilidades hidráulicas y fluctuaciones de presión de alto estrés. La metodología empleada consistió en desarrollar un modelo numérico a partir de la geometría escalada de un modelo de turbina correspondiente, utilizando el software de simulación ANSYS®. Para optimizar la precisión numérica y los costos computacionales, se realizaron varias simplificaciones en el modelo. El dominio del álabe guía y el rotor se definió como asimétrico, no se modeló la capa de epoxi aplicada a las palas del rotor durante las mediciones experimentales y se emplearon holguras constantes en las palas del rotor. La simulación inestable se llevó a cabo utilizando el modelo de turbulencia SAS- SST y se validó con datos experimentales de par y presión proporcionados por Soltani et al. Los resultados mostraron que las cantidades medias obtenidas de la simulación numérica estaban en buen acuerdo con los datos experimentales. Los valores de presión se capturaron mejor en el lado de presión de la pala del rotor en comparación con el lado de succión. Sin embargo, la amplitud de las fluctuaciones de presión se predijo con mayor precisión en el lado de succión de la pala del rotor. La amplitud de las fluctuaciones del par se subestimó considerablemente, por un factor de 30. En las conclusiones, se destacó que la metodología numérica propuesta proporcionó una buena aproximación a las condiciones reales de operación SNL de la Turbina Kaplan. Las frecuencias de las fluctuaciones de presión numéricas coincidieron bien con los valores experimentales, especialmente en las ubicaciones definidas en el lado de succión de la pala del rotor. Sin embargo, las amplitudes de los picos de presión se subestimaron en el lado de presión de la pala del rotor. Además, se observó que el tiempo total de simulación tuvo una fuerte influencia en las conclusiones del estudio, ya que inicialmente solo se capturaron dos estructuras de vórtice, seguidas por la formación de un tercer y cuarto vórtice al final de la simulación.

(Peón Herrera, 2021), en su tesis de pregrado, llevó a cabo el diseño y la simulación de una Turbina Kaplan mediante el uso de herramientas de dinámica de fluidos

computacional (CFD). El objetivo principal fue estudiar el comportamiento del flujo en las distintas áreas del rodete y determinar la eficiencia de la turbina. La metodología comenzó con una revisión preliminar de las turbomáquinas, destacando las características de las turbinas axiales tipo Kaplan, su diseño geométrico y su posición en una planta hidroeléctrica. A continuación, se describió la dinámica de fluidos computacional (CFD), la cual fue fundamental para este proyecto. Se llevó a cabo el diseño de la geometría, la creación de la malla y la simulación de la turbina utilizando varios programas de software integrados en Ansys Workbench, como BladeGen y Fluent, entre otros. Se recopilaron los datos necesarios para la simulación a partir de cálculos específicos, empleando información técnica de una planta hidroeléctrica en España que utiliza turbinas Kaplan. Los hallazgos de la simulación revelaron una notable exactitud al contrastarse con los cálculos teóricos. Las magnitudes promedio obtenidas fueron bastante precisas, aunque se identificaron pequeñas discrepancias debido a la precisión de los cálculos y a los modelos de trabajo de CFD empleados. El estudio de la eficiencia de la Turbina Kaplan mostró distintos comportamientos provocados por el flujo turbulento. Además, se subrayó la habilidad del software Ansys para operar tanto en paralelo como en serie con diversos programas, permitiendo la actualización de datos en varias etapas del proceso. Las conclusiones subrayaron la relevancia actual de las herramientas de CFD, destacando su alta precisión en los resultados y el considerable ahorro de tiempo y costos en comparación con los estudios experimentales. La investigación evidenció que Ansys es un software robusto y flexible, ofreciendo una amplia variedad de opciones y parámetros que posibilitan realizar simulaciones altamente precisas. A pesar de haber empleado únicamente una fracción de las capacidades del software, los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios y coincidieron estrechamente con los cálculos teóricos.

1.1.2 Antecedentes nacionales

(Gonzales Pareja & Mejia Ramos, 2023), en sus tesis de suficiencia profesional, desarrollaron una plataforma de pruebas para analizar el rendimiento de turbinas Kaplan y

Pelton en la generación de 1 kW de energía eléctrica, con el objetivo de mejorar la eficiencia de las microcentrales hidroeléctricas. Para lograr este objetivo, el estudio implementó un sistema compuesto por dos bombas que impulsaban el agua desde un reservorio hacia las turbinas. Cada línea de tubería estaba equipada con un regulador de caudal, lo que permitía controlar tanto la potencia como la frecuencia de la energía eléctrica generada. Se realizaron simulaciones del diseño de las turbinas para analizar su desempeño y determinar un sistema de control eficaz. Se empleó un controlador de frecuencia en cascada con el objetivo de asegurar una producción de energía estable. Este controlador permitió alcanzar un tiempo de establecimiento máximo de 5 segundos y un sobreimpulso máximo inferior al 5%. Los hallazgos indicaron que la Turbina Kaplan alcanzó una eficiencia del 57.2%, mientras que la turbina Pelton logró una eficiencia del 81.5%. Las variaciones en la eficiencia entre las dos turbinas se debieron a ajustes en las condiciones operativas: se aumentó la altura de caída para la turbina Pelton y el caudal para la Turbina Kaplan, lo que resultó en una mejora de la eficiencia en ambos casos. Las simulaciones verificaron que el diseño de las turbinas es apropiado para micro y minicentrales hidroeléctricas. Sin embargo, se observó que la eficiencia de la Turbina Kaplan en este estudio fue inferior a la eficiencia promedio de otras turbinas que se utilizan para generar una mayor potencia. El estudio concluyó que emplear un identificador del modelo de planta, en lugar de recurrir a modelos matemáticos, ofreció una representación más precisa del comportamiento de las turbinas. Además, la creación de los controladores de frecuencia utilizando el bloque PID en Simulink resultó ser efectiva para regular la frecuencia, logrando tiempos de estabilización de 4 segundos en las turbinas Kaplan y de 5 segundos en las turbinas Pelton, con un sobreimpulso máximo por debajo del 5%. El análisis realizado en el banco de pruebas proporcionó una visión más detallada sobre cómo funcionan las turbinas y el proceso de generación de energía hidroeléctrica. Se observó que, a pesar de no ser la tecnología más reciente, el controlador PID se mantiene como una herramienta confiable con tiempos de respuesta ágiles.

(Garcia Sandoval, 2021), en su tesis de pregrado, llevó a cabo una simulación detallada de la microcentral situada en la comunidad de Kadagaya, en Junín, empleando el software Ansys CFX para modelar su desempeño. Para alcanzar este objetivo, se utilizó información sobre el diseño y operación de la microcentral de Kadagaya y llevó a cabo una visita al lugar para inspeccionar minuciosamente su funcionamiento y recolectar datos que ayudaran a validar el modelo numérico. La simulación se realizó en dos etapas: la primera se dedicó al análisis de la generación del vórtice, y la segunda examinó cómo se comportaba el vórtice cuando la turbina estaba situada en su centro. Los hallazgos de la simulación mostraron que los datos experimentales del flujo, obtenidos durante la visita al lugar, coincidían con las predicciones del modelo numérico. El patrón de flujo que se simuló era comparable de manera cualitativa al flujo que se vio en la microcentral de Kadagaya, además de parecerse a los modelos reducidos de vórtices gravitacionales. En conclusión, el estudio reveló que las simulaciones numéricas pueden ser una herramienta útil para investigar y entender las microcentrales de vórtices gravitacionales, que tienen el potencial de generar hasta 10 kW con alturas de agua de 2 metros. A pesar de que se desarrolló un enfoque robusto para simular el flujo en estas instalaciones, se sugirió ajustar los parámetros en el software y explorar modelos de turbulencia adicionales para aumentar la exactitud de las simulaciones.

(Aponte Simbrón, 2019), en su tesis de pregrado, desarrolló una turbina hidráulica que aprovechara la energía en las tuberías de agua de la Compañía Minera Antamina S.A. El propósito principal de esta iniciativa era producir electricidad para iluminar la zona 720, al mismo tiempo que se fomentaba la protección del medio ambiente mediante el uso de una fuente de energía renovable. Para lograr este objetivo, se utilizó el enfoque metodológico VDI 2222-2225, que facilitó la mejora en cada etapa del diseño. Inicialmente, se realizaron análisis detallados de los antecedentes y conceptos teóricos relevantes. A continuación, se realizó una valoración técnica y económica que ayudó a identificar la solución más adecuada para el proyecto. A partir de estos estudios, se realizaron los cálculos necesarios para definir y escoger los elementos que conformarían la turbina

hidráulica. El diseño definitivo de la turbina logró producir 152 watts de energía eléctrica con un flujo de fluido de 1.12 m/s. Asimismo, se crearon planos de fabricación precisos que facilitaron la construcción del diseño. Las conclusiones del análisis destacaron varios aspectos importantes. En primer lugar, el uso de la metodología VDI 2222-2225 permitió desarrollar un diseño que no solo satisfizo las necesidades del cliente, sino que también logró la potencia requerida. Se elaboraron planos detallados para la construcción y montaje de la turbina, siguiendo los requisitos especificados. El rotor de la turbina, con un diámetro de 0.84 metros y construido en PA tipo 6, funcionó a una velocidad de 127.55 RPM. El perfil aerodinámico NREL S833 resultó ser el más idóneo, alcanzando un coeficiente de sustentación de 0.805. Asimismo, la utilización de software para simulaciones fue esencial para evaluar las geometrías complejas y optimizar el diseño.

(Egúsquiza León, 2020), en su tesis de título profesional, desarrolló y modeló un rotor para una turbina hidrocínética con una capacidad de generación de 15 kW, basándose en datos de velocidad y profundidad recolectados de cuatro ríos en la Amazonía entre 2011 y 2018. El río Huallaga fue escogido para el proyecto debido a su mayor velocidad media y profundidad adecuada. El enfoque metodológico abarcó el diseño del rotor empleando el modelo aerodinámico Blade Element Momentum (BEM), y posteriormente se llevó a cabo una simulación con el software QBlade. Se tomaron en cuenta diversas variables, como la velocidad del río, las dimensiones del álabe (como la longitud de cuerda, el perfil hidrodinámico y el ángulo de inclinación), así como la velocidad específica y el número de Reynolds. Se creó un rotor horizontal de tres palas con un diámetro de 1 metro, empleando el perfil NACA 4412. Se comprobó que el rotor lograba un coeficiente de potencia de 0.496 a una velocidad de 2.75 m/s, generando así una potencia de 15 kW. La simulación presentó un margen de error del 2.29% en el coeficiente de potencia. Los datos indicaron que el rotor diseñado tenía la capacidad de producir 105.88 MWh al año, con un factor de planta del 81%. Esta capacidad energética podría satisfacer las necesidades de 18 individuos, cubriendo el 7.15% de la demanda energética del Centro Poblado Nuevo Control en San Martín. La turbina mostró una alta eficiencia,

operando de manera óptima en un rango de velocidad de 2 a 4 m/s. Además, el perfil NACA 4412 proporcionó una sobresaliente relación entre los coeficientes de sustentación y resistencia. En las conclusiones, se resaltó que el río Huallaga poseía el mayor potencial para la generación de energía hidrocínética entre los ríos analizados, con una densidad de potencia de 11.9 kW/m² y una velocidad mínima de corriente superior a 1 m/s. El análisis del diseño de la turbina hidrocínética reveló que la eficiencia mejoraba a medida que aumentaba la altura de caída en el caso de la turbina Pelton, y con el aumento del caudal para la Turbina Kaplan. También se notó que la producción de energía variaba de manera exponencial en función de la velocidad del río, siendo casi inexistente cuando la velocidad era menor a 1 m/s. Por último, se determinó que la turbina desarrollada podría satisfacer el 7.35% de las necesidades energéticas de la comunidad, y que serían necesarias 14 turbinas para cumplir con el suministro eléctrico total requerido.

(Sevilla Becerra, 2021), en su tesis de pregrado, identificó la Configuración óptima para un modelo computacional de la rápida hidráulica de Curumuy, basándose en mediciones realizadas en la estructura como referencia para su validación. Se llevó a cabo un proceso metodológico que abarcó una inspección en el sitio para observar la Configuración del sistema hidráulico, y se realizaron mediciones de la velocidad y del nivel del agua tanto en la cámara de entrada como en el canal rápido. Se compararon estos datos con los generados por la simulación para perfeccionar y verificar la Configuración del modelo. Para desarrollar y validar el modelo de simulación, se empleó el software ANSYS CFX. Los hallazgos mostraron que el modelo de simulación logró representar con precisión los fenómenos hidráulicos y permitió simular flujos de superficie libre. Los diagramas de líneas de flujo facilitaron la detección del área de resalto hidráulico y los cambios en la velocidad. La efectividad del resalto hidráulico fue notable, con una eficiencia del 67.88%. Se identificó que el resalto en cuestión era del tipo ahogado, y se observaron algunas variaciones en los niveles conjugados y normales debido a la turbulencia. Además, el uso de un mallado combinado en el modelo optimizó el aprovechamiento de los recursos computacionales y aseguró una simulación de alta calidad. Las conclusiones del estudio

indican que el análisis estacionario con refinamiento proporcionó una descripción más exacta del flujo en comparación con el análisis transitorio sin refinamiento, mostrando desviaciones porcentuales similares en ambos casos. Las variaciones en los tirantes y velocidades estuvieron afectadas por la turbulencia y las restricciones en las mediciones, lo cual sugiere que investigaciones futuras podrían incrementar la precisión de los resultados. En consecuencia, el modelo numérico presentado proporciona una base robusta para el diseño de estructuras hidráulicas comparables y se encuentra en proceso de calibración para mejorar la interpretación de los resultados requeridos en futuros proyectos.

1.2 Identificación y descripción del problema de estudio

El acceso universal a la electricidad sigue siendo un desafío global a pesar de los avances significativos logrados en las últimas décadas. Según un informe del Banco Mundial y varias agencias de las Naciones Unidas, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente 675 millones de personas en el mundo no tienen acceso a la electricidad. Aunque el porcentaje global de personas con acceso mejoró del 85% en 2010 al 91% en 2021, las disparidades regionales continúan siendo preocupantes, especialmente en áreas como el África Subsahariana, donde la falta de infraestructura y recursos económicos limita significativamente el acceso a servicios básicos de energía (Forbes Staff, 2023).

A nivel mundial, la energía hidroeléctrica es la fuente renovable más utilizada, con más de 1,2 teravatios (TW) de capacidad instalada. Sin embargo, las pequeñas hidroeléctricas, que tienen un potencial para electrificar comunidades rurales y remotas, representan solo 78 gigavatios (GW) de capacidad instalada, es decir, un 1,9% del total de la capacidad energética global. A pesar de su potencial, estas minicentrales hidroeléctricas a menudo no logran aprovechar todo el recurso hídrico debido a deficiencias en el diseño y la tecnología de las turbinas utilizadas, lo que deriva en una baja calidad de energía generada y un rendimiento insuficiente (Perico-Granado et al., 2023).

En regiones como América Latina y el Caribe, donde la población que carece de acceso a la electricidad asciende a 17 millones de personas y otros 75 millones no tienen combustibles ni tecnologías limpias para cocinar, las carencias energéticas están directamente relacionadas con la pobreza y desigualdades sociales. Las comunidades más afectadas suelen ser rurales, indígenas y afrodescendientes, lo que evidencia una profunda inequidad económica y geográfica. En promedio, un 15% de la población que vive en viviendas precarias no tiene acceso a electricidad, cifra que aumenta a entre el 30% y 40% en países como Bolivia, Chile, Honduras, y Nicaragua, agravando la vulnerabilidad de estas comunidades (CEPAL, 2022a, 2022b).

En el Perú, cerca de dos millones de personas carecen de acceso a electricidad, a pesar de los esfuerzos del gobierno por reducir esta brecha en las últimas décadas. Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), la cobertura de electrificación rural pasó del 65% en 2017 al 85,8% en 2023, un progreso significativo pero insuficiente para alcanzar las metas proyectadas para 2026. La electrificación rural no solo es un imperativo social, sino también económico, ya que podría generar hasta un 17% de oportunidades de negocio y nuevos empleos, impulsando el desarrollo de las comunidades (Gestión, 2024).

La energía hidroeléctrica en Perú tiene un rol central en la matriz energética nacional. Hasta febrero de 2023, las centrales hidroeléctricas generaron 3,307 GWh, representando aproximadamente el 63% de la generación eléctrica nacional. Sin embargo, las cifras muestran que aún existe un gran potencial por explotar. Las características únicas del país, como la presencia de la cordillera de los Andes, brindan una oportunidad invaluable para el desarrollo de la hidroenergía en ríos de bajo caudal, que son comunes en zonas rurales y aisladas (MINEM, 2023).

A pesar del abundante potencial hidroeléctrico, muchas instalaciones en ríos de bajo caudal enfrentan desafíos importantes. Las tecnologías actuales, especialmente las turbinas convencionales como las Kaplan, no están totalmente adaptadas para operar eficientemente en condiciones de bajo flujo. Las pérdidas de energía por turbulencia,

diseño no optimizado y el desgaste prematuro de componentes limitan su rendimiento. Esto no solo afecta la calidad de la energía generada, sino que también incrementa los costos operativos y reduce la vida útil de las turbinas.

En este sentido, el diseño y la operación de turbinas para ríos de bajo caudal requieren un enfoque más especializado que considere las variaciones en el flujo y las condiciones locales del recurso hídrico. Las herramientas de simulación numérica, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), representan una solución viable para abordar estos problemas, permitiendo modelar y analizar de manera precisa las interacciones entre el agua y las turbinas, y optimizar así su desempeño.

La optimización de Micro Turbinas Kaplan mediante simulación numérica es un paso crucial para mejorar la generación de energía en ríos de bajo caudal. Estas turbinas son ampliamente utilizadas debido a su diseño adaptable, que permite ajustar los álabes y las palas para maximizar el rendimiento. Sin embargo, en escenarios de bajo flujo, su eficiencia puede disminuir significativamente si no se adapta correctamente la geometría de sus componentes.

La simulación numérica CFD permite evaluar y mejorar estos diseños sin necesidad de realizar pruebas físicas costosas y laboriosas. Este enfoque reduce los tiempos de desarrollo, minimiza los costos de experimentación y asegura que las turbinas estén mejor adaptadas a las condiciones operativas específicas. Además, un diseño optimizado puede aumentar el coeficiente de potencia, asegurando que se aproveche al máximo el recurso hídrico disponible, y contribuyendo a la sostenibilidad energética de las comunidades rurales.

La falta de acceso a electricidad tiene implicaciones significativas en la calidad de vida de las comunidades rurales. Sin energía, las poblaciones quedan excluidas de servicios básicos como iluminación, refrigeración y telecomunicaciones, y enfrentan barreras para acceder a la educación, la atención médica y oportunidades económicas. La implementación de turbinas optimizadas para ríos de bajo caudal no solo tiene el potencial

de electrificar estas áreas, sino que también puede reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables, como el diésel, que son más costosas y contaminantes.

Desde una perspectiva ambiental, la generación hidroeléctrica representa una opción limpia y sostenible, especialmente cuando se desarrolla con tecnologías adaptadas a las características locales. Las turbinas optimizadas para ríos de bajo caudal permiten minimizar el impacto ambiental al reducir las emisiones de carbono asociadas con otras fuentes de energía y al garantizar un uso más eficiente y responsable de los recursos hídricos.

La problemática identificada en el uso de Micro Turbinas Kaplan en ríos de bajo caudal abarca aspectos tecnológicos, económicos, sociales y ambientales. En un contexto global donde la electrificación universal y el acceso a fuentes renovables son objetivos prioritarios, resulta imperativo optimizar las tecnologías existentes para maximizar su impacto. En el caso peruano, la mejora del diseño y operación de Micro Turbinas Kaplan puede contribuir significativamente a cerrar la brecha energética rural, promoviendo el desarrollo económico y social de las comunidades más vulnerables y reduciendo la presión sobre los recursos fósiles.

La integración de herramientas como la simulación numérica CFD en este proceso no solo representa un avance tecnológico, sino también un compromiso con la sostenibilidad y la justicia energética, permitiendo aprovechar al máximo los recursos disponibles y garantizando un futuro más limpio y equitativo.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema General

¿De qué manera el análisis numérico permite optimizar el coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan, considerando sus características geométricas y las condiciones hidráulicas del flujo?

1.3.2 Problemas Específicos

1. ¿Cómo influye el diseño y modelado geométrico del rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan en su eficiencia y aprovechamiento energético en ríos de bajo caudal?
2. ¿Qué condiciones hidráulicas y de flujo deben caracterizarse mediante simulación numérica para identificar los parámetros operativos óptimos en ríos de bajo caudal?
3. ¿De qué manera la evaluación del coeficiente de potencia bajo distintas alturas de caída de agua permite validar la eficiencia de la Micro Turbina Kaplan para condiciones específicas de ríos de bajo caudal?

1.4 Justificación e importancia

El análisis numérico de una Micro Turbina Kaplan para ríos de bajo caudal representa un enfoque innovador y necesario en el contexto de la transición energética hacia fuentes renovables. La creciente demanda global de energía limpia, junto con la necesidad de maximizar la eficiencia de los recursos disponibles, ha puesto de manifiesto la importancia de optimizar tecnologías existentes como las Micro Turbinas Kaplan, que han demostrado ser una solución eficaz para la generación hidroeléctrica en ríos de bajo caudal.

1.4.1 Justificación Técnica

Los ríos de bajo caudal presentan desafíos únicos para la generación de energía hidroeléctrica, dado que los flujos son más variables y tienen menores niveles de energía cinética disponible. En este contexto, las Micro Turbinas Kaplan, diseñadas originalmente para operar en condiciones de bajo salto y altos caudales, requieren adaptaciones específicas para funcionar eficientemente en escenarios de bajo flujo. Estas adaptaciones incluyen ajustes en el diseño geométrico de las palas, el ángulo de ataque y los álabes guía, así como una Configuración precisa que garantice una conversión eficiente de la energía hidráulica en energía mecánica.

La simulación numérica basada en dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se presenta como una herramienta en este proceso. A través de la CFD, es posible modelar de manera precisa el comportamiento del flujo de agua en interacción con las palas de la turbina, analizar los patrones de turbulencia y pérdida de energía, y realizar iteraciones de diseño sin necesidad de construir prototipos físicos. Esto no solo reduce los costos asociados con pruebas físicas laboriosas, sino que también permite una mayor flexibilidad para explorar configuraciones y escenarios operativos.

1.4.2 Justificación Económica

El uso de simulación numérica para optimizar Micro Turbinas Kaplan tiene implicaciones económicas significativas. Un diseño optimizado no solo mejora el coeficiente de potencia, aumentando la generación de energía eléctrica, sino que también reduce el desgaste de las palas y componentes mecánicos, lo que a su vez disminuye los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil de la turbina. Este enfoque permite una mayor rentabilidad de las instalaciones hidroeléctricas, especialmente en comunidades rurales o remotas, donde las soluciones energéticas deben ser económicas y sostenibles a largo plazo.

Además, al maximizar el rendimiento energético, las turbinas optimizadas pueden reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que implica un ahorro económico adicional para las comunidades que adoptan estas tecnologías. Este beneficio es particularmente relevante en regiones donde la generación de energía a partir de fuentes no renovables representa un costo elevado tanto económico como ambiental.

1.4.3 Justificación Ambiental

Desde una perspectiva ambiental, la optimización de Micro Turbinas Kaplan para ríos de bajo caudal contribuye directamente a los objetivos globales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático. Las Micro Turbinas Kaplan son reconocidas por su capacidad de operar con un impacto mínimo en el ecosistema fluvial, pero su diseño y

operación deben ser cuidadosamente adaptados para garantizar que este impacto sea aún menor.

Un diseño eficiente basado en simulaciones numéricas permite minimizar las pérdidas de energía y la generación de calor residual, reduciendo así el impacto térmico en los cuerpos de agua. Asimismo, el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico asegura que no se desperdicien flujos potenciales de generación, maximizando la sostenibilidad del proyecto. Este enfoque también promueve un uso más responsable de los recursos naturales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, particularmente en lo relacionado con el acceso a energía asequible y limpia (ODS 7) y la acción climática (ODS 13).

1.4.4 Justificación Social

La implementación de Micro Turbinas Kaplan optimizadas mediante simulación numérica tiene un impacto social significativo, especialmente en comunidades rurales que carecen de acceso confiable a la energía eléctrica. En estas regiones, los ríos de bajo caudal representan una oportunidad única para implementar proyectos de generación hidroeléctrica a pequeña escala, que puedan satisfacer las necesidades energéticas locales de manera sostenible.

Un diseño optimizado de Micro Turbinas Kaplan asegura una producción de energía confiable y constante, lo que facilita el acceso a servicios básicos como iluminación, refrigeración y telecomunicaciones, mejorando así la calidad de vida de los habitantes. Además, la implementación de estas tecnologías puede generar empleo local en las etapas de instalación, operación y mantenimiento, promoviendo el desarrollo económico de estas comunidades.

1.4.5 Importancia Académica y Científica

Desde un punto de vista académico y científico, esta investigación contribuye al cuerpo de conocimiento existente sobre la optimización de turbinas hidroeléctricas mediante simulación numérica. La aplicación de herramientas CFD en el análisis de Micro

Turbinas Kaplan para ríos de bajo caudal no solo valida la eficacia de estas tecnologías, sino que también abre la puerta a nuevas líneas de investigación en el diseño y operación de sistemas hidroeléctricos sostenibles.

Este estudio también tiene el potencial de establecer un marco de referencia para futuros proyectos de generación hidroeléctrica en condiciones similares, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y eficientes en regiones donde los recursos hídricos son limitados. Asimismo, fomenta la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, científicos y técnicos para abordar los desafíos asociados con la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

1.4.6 Relevancia Estratégica

La optimización de Micro Turbinas Kaplan mediante simulación numérica también tiene implicaciones estratégicas a nivel nacional e internacional. En un contexto donde los gobiernos buscan diversificar sus matrices energéticas y reducir las emisiones de carbono, el desarrollo de tecnologías hidroeléctricas adaptadas a ríos de bajo caudal se presenta como una solución viable y escalable. Este tipo de proyectos puede ser integrado en políticas públicas relacionadas con el fomento de las energías renovables, la electrificación rural y la adaptación al cambio climático.

Además, la exportación de conocimiento técnico y diseño optimizado de Micro Turbinas Kaplan puede posicionar a las instituciones y empresas involucradas como líderes en el sector de las energías renovables, abriendo oportunidades para la colaboración internacional y el acceso a fondos de inversión destinados a proyectos sostenibles.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Analizar una Micro Turbina Kaplan para optimizar el coeficiente de potencia mediante simulación numérica.

1.5.2 Objetivo Específico

1. Diseñar y modelar geométricamente el rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan, considerando parámetros hidráulicos y operativos de ríos de bajo caudal.
2. Caracterizar hidráulicamente las condiciones hidráulicas y de flujo en ríos de bajo caudal mediante simulación numérica en ANSYS CFX, evaluando parámetros clave como velocidad y presión.
3. Evaluar el coeficiente de potencia de la Micro Turbina Kaplan bajo distintas alturas de caída de agua, utilizando herramientas de simulación numérica.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

El coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan puede ser optimizado mediante el análisis geométrico y operativo, evaluado a través de simulaciones numéricas que consideran parámetros hidráulicos específicos.

1.6.2 Hipótesis Específicas

1. El diseño y modelado geométrico del rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan, basado en parámetros hidráulicos y operativos de ríos de bajo caudal, influye significativamente en la optimización del coeficiente de potencia.
2. La caracterización hidráulica mediante simulación numérica en ANSYS CFX permite identificar condiciones óptimas de velocidad y presión en ríos de bajo caudal, impactando en el rendimiento de la turbina.
3. La evaluación del coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan bajo distintas alturas de caída de agua, realizada con herramientas de simulación numérica, valida su eficiencia y capacidad de aprovechamiento energético en ríos de bajo caudal.

1.7 Variables, dimensiones e indicadores

A continuación, la operacionalización de las variables.

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	OPERACIONALIZACIÓN		ESCALA DE MEDICIÓN
			DIMENSIONES	INDICADORES	
Variable dependiente (Y): Y1: Coeficiente de potencia de la Micro Turbina Kaplan evaluado bajo distintas condiciones hidráulicas mediante simulación numérica	El coeficiente de potencia es una medida adimensional que evalúa la eficiencia de una turbina hidráulica en convertir la energía cinética del flujo en energía mecánica o eléctrica. Este coeficiente refleja qué porcentaje de la energía del flujo es aprovechado por la turbina bajo ciertas condiciones de operación.	Se calculará el coeficiente de potencia mediante simulación numérica en ANSYS CFX, utilizando datos como velocidad del fluido, densidad del agua y área transversal del flujo. Se realizarán simulaciones bajo distintas alturas de caída de agua y velocidades de flujo para analizar cómo varía el coeficiente en cada caso.	Coeficiente de potencia de Micro Turbina Kaplan	• Potencia real generada • Potencia teórica disponible • Coeficiente de potencia (relación entre potencia real y teórica)	• (kW) • (kW) • Adimensional
Variable independiente (X): X1: Características geométricas, hidráulicas y operativas de una Micro Turbina Kaplan diseñada para ríos de bajo caudal	Las características de una Micro Turbina Kaplan incluyen parámetros geométricos, como el diseño del rodete y los álabes; parámetros hidráulicos, como la presión y velocidad del flujo; y condiciones operativas específicas para ríos con caudales bajos. Estas características determinan su rendimiento y eficiencia.	Se definirán las características geométricas del rodete y los álabes utilizando ANSYS BladeGen y TurboGrid, mientras que las condiciones hidráulicas, como caudal, presión y velocidad, serán simuladas en ANSYS CFX. Los resultados se analizarán para evaluar su influencia en el coeficiente de potencia y la eficiencia global de la turbina bajo diferentes escenarios operativos.	Geometría de la Micro Turbina Kaplan en condiciones de contorno hidráulico	• Tipo de perfil hidráulico del álabe • Largo de la álabe y radio del rotor • Ángulo de los álabes • Presión atmosférica • Caudal	• Nominal: Tipo • (m) • (°) • (Pa) • (m³/s)
			Características de operación de la Micro Turbina Kaplan	• Contorno de presiones sobre la superficie de perfiles • Densidad de agua • Velocidades de fluido • Área proyectada de turbina • Velocidad angular del rotor	• (Pa) • (kg/m³) • (m/s) • (m²) • (RPM)
			Interacción de fases de simulación numérica	• Tipo de enmallado • Dominio computacional • Fuerzas sobre la superficie de perfiles • Torque	• Nominal: Tipo de perfil • (m³) • (N) • (KN)

1.8 Unidad de análisis

La unidad de análisis de esta investigación es la Micro Turbina Kaplan diseñada específicamente para operar en ríos de bajo caudal, con énfasis en su rendimiento energético medido a través del coeficiente de potencia. Este parámetro evalúa la capacidad de la turbina para convertir eficientemente la energía cinética del agua en energía útil, considerando su desempeño bajo distintas condiciones hidráulicas.

El diseño de la turbina incorpora álabes ajustables, los cuales se adaptan dinámicamente a las variaciones del flujo de agua, típico de ríos con velocidades de entre 2 y 6 m/s, según lo observado en los resultados simulados. Estas características de diseño aseguran su idoneidad para escenarios de bajo caudal, donde la disponibilidad de energía hidráulica es limitada.

El análisis incluye variables geométricas y operativas como el perfil hidráulico de los álabes, el torque generado, la distribución de presiones en las superficies del rodete y las condiciones hidráulicas de entrada y salida del flujo. Estas características se evalúan mediante simulaciones numéricas avanzadas utilizando herramientas como ANSYS CFX, lo que permite una comprensión detallada del comportamiento de la turbina. Este enfoque sigue las directrices metodológicas propuestas por (Sánchez Antillón, 2009), quienes destacan la importancia de definir un nivel exacto de observación para evaluar las variables específicas del estudio.

1.9 Fuentes de información

Las fuentes de información seleccionadas para este estudio sobre la Micro Turbina Kaplan para ríos de bajo caudal son:

- Literatura académica: Esquemas referenciales de turbinas hidrocínicas de (Arrieta & Clemente, 2019), que proporcionan fundamentos teóricos y conceptuales sobre diseño y optimización.
- Informes técnicos nacionales: Datos hidrológicos y climáticos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

del Perú (SENAMHI), relevantes para caracterizar las condiciones operativas en ríos peruanos.

- Documentación internacional: Referencias científicas y modelos de la NASA, útiles para validar las simulaciones numéricas.
- Manual de ANSYS CFX: Este documento técnico fue utilizado como referencia principal para configurar y ejecutar las simulaciones en el módulo ANSYS CFX. Su contenido permitió definir parámetros de simulación, configurar dominios rotativos y evaluar el comportamiento hidráulico del modelo de turbina.

1.10 Tipo y nivel de investigación

1.10.1 Tipo de investigación

La presente investigación es aplicada, ya que tiene como objetivo resolver un problema práctico relacionado con la optimización de Micro Turbinas Kaplan para ríos de bajo caudal mediante simulación numérica. Este tipo de investigación busca generar conocimiento técnico que permita optimizar el coeficiente de potencia de las turbinas, incrementando su eficiencia y adaptabilidad en condiciones específicas. Los resultados se orientan a la implementación directa en escenarios reales, como proyectos hidroeléctricos en zonas rurales con recursos hídricos limitados, contribuyendo al desarrollo energético sostenible y a la electrificación de comunidades vulnerables. Por tanto, se enfoca en la utilidad práctica de sus hallazgos.

1.10.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación de este estudio es descriptivo-correlacional, ya que busca caracterizar y analizar el comportamiento de una Micro Turbina Kaplan diseñada para ríos de bajo caudal, evaluando su rendimiento energético mediante simulación numérica.

El enfoque descriptivo se centra en documentar las propiedades geométricas, operativas e hidráulicas de la turbina, incluyendo parámetros como el coeficiente de potencia, el torque generado y la distribución de presiones en los álabes. Por otro lado,

el componente correlacional establece relaciones entre las características de diseño y operación de la turbina (como las alturas de caída de agua y las velocidades del flujo) y el rendimiento energético obtenido, representado por el coeficiente de potencia.

Este enfoque permite no solo describir las variables en estudio, sino también identificar patrones y dependencias que puedan ser utilizados para optimizar el diseño y optimizar la eficiencia de la turbina en escenarios de bajo caudal.

1.11 Método de diseño de la investigación

El diseño de investigación es experimental, ya que se manipulan variables específicas, como las características geométricas y operativas de la Micro Turbina Kaplan, para evaluar su impacto en el coeficiente de potencia mediante simulación numérica. A través de experimentos computacionales, se recrean y controlan las condiciones de operación en ríos de bajo caudal, permitiendo medir y analizar los resultados bajo distintos escenarios. Este enfoque busca establecer relaciones causales entre las modificaciones realizadas en el diseño de la turbina y su rendimiento energético, proporcionando evidencia directa de los efectos de estas variables en su eficiencia operativa.

El enfoque de la investigación es mixto, ya que combina elementos cuantitativos y cualitativos para abordar los objetivos del estudio. Por un lado, el enfoque cuantitativo se utiliza para realizar simulaciones numéricas y medir variables como el coeficiente de potencia, torque y distribución de presiones, permitiendo analizar datos objetivos y verificables. Por otro lado, el enfoque cualitativo se aplica al interpretar los resultados de las simulaciones y relacionarlos con las condiciones operativas y de diseño de la Micro Turbina Kaplan, generando una comprensión más integral del problema. Este enfoque integrado asegura un análisis profundo y una mayor aplicabilidad de los resultados.

1.12 Población y muestra

1.12.1 Población

La población de este estudio comprende todas las Micro Turbinas Kaplan diseñadas para operar en ríos de bajo caudal. Esto incluye diseños estándar y personalizados utilizados en proyectos hidroeléctricos de pequeña escala, enfocados en maximizar la eficiencia energética en entornos con flujos limitados. Esta población abarca turbinas con características geométricas y operativas adaptables, utilizadas tanto en contextos académicos como en aplicaciones industriales, donde se busca generar energía limpia y sostenible en condiciones específicas de bajo caudal y velocidad de flujo. inspiradas de la literatura de (Arrieta & Clemente, 2019).

1.12.2 Muestra

La muestra de este estudio consiste en una Micro Turbina Kaplan diseñada específicamente para ríos de bajo caudal, basada en condiciones hidráulicas y operativas típicas de ríos peruanos. Este modelo es representativo debido a su capacidad para adaptarse a variaciones en el flujo de agua, con velocidades comprendidas entre 2 y 3 m/s y alturas de caída de hasta 2 metros.

El diseño geométrico del rodete y sus álabes, optimizados mediante herramientas de simulación numérica como ANSYS BladeGen y CFX, constituye el núcleo de esta muestra. Asimismo, se incluyen los datos hidráulicos específicos de un entorno operativo simulado, que son validados utilizando información hidrológica y climática proporcionada por instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y SENAMHI.

El análisis se limita a este modelo, considerando las características de su diseño, operación y su capacidad para maximizar el coeficiente de potencia en condiciones de bajo caudal. Esta muestra permite generalizar los resultados a Micro Turbinas Kaplan con aplicaciones similares en escenarios hidroeléctricos de pequeña escala.

1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la presente investigación, se emplearán técnicas e instrumentos orientados a recopilar datos precisos y confiables relacionados con el diseño, operación y rendimiento de la Micro Turbina Kaplan en condiciones de bajo caudal. Estas herramientas permitirán analizar las variables definidas en el estudio.

1.13.1 Técnicas:

A) Simulación Numérica

- Modelado computacional de la geometría del rodete y los álabes de la Micro Turbina Kaplan utilizando ANSYS BladeGen.
- Configuración y ejecución de simulaciones en ANSYS CFX para analizar el comportamiento del flujo y calcular el coeficiente de potencia en diferentes escenarios de operación.
- Evaluación del impacto de las condiciones hidráulicas en parámetros clave como velocidad, presión y torque.

B) Análisis Documental

- Revisión de literatura científica especializada sobre diseño y optimización de Micro Turbinas Kaplan.
- Consulta de reportes técnicos e información hidrológica proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el SENAMHI, que permiten contextualizar las simulaciones en escenarios reales de ríos de bajo caudal.

1.13.2 Instrumentos:

A) Software de Simulación (ANSYS BladeGen, TurboGrid y CFX)

- Herramientas principales para el diseño geométrico del rodete, la generación del mallado tridimensional y el análisis del flujo, permitiendo evaluar parámetros como eficiencia hidráulica, coeficiente de potencia y comportamiento del flujo.

B) Bases de Datos Hidrológicos

- Información oficial de ANA y SENAMHI utilizada para definir las condiciones hidráulicas de entrada en los modelos numéricos, incluyendo caudal, velocidad del agua y altura de caída.

C) Modelos de Referencia

- Configuraciones de turbinas hidrocinéticas extraídas de literatura académica y estudios previos para comparar y validar los resultados obtenidos en el presente estudio.

D) Documentos Técnicos

- Manual de ANSYS BladeGen y CFX como guía para la Configuración de las simulaciones y el análisis del rendimiento de la turbina.
- Reportes técnicos que facilitan la interpretación de los resultados y el ajuste del diseño según los datos obtenidos.

1.14 Análisis y procesamiento de datos

El análisis y procesamiento de datos en esta investigación se orienta a evaluar el rendimiento de una Micro Turbina Kaplan diseñada para ríos de bajo caudal, empleando herramientas avanzadas de simulación numérica. Este enfoque permite analizar de manera detallada parámetros clave que determinan la eficiencia y efectividad del diseño.

1.14.1 Etapas del Análisis y Procesamiento:

A) Preparación del Modelo

- Generación de un modelo tridimensional del rodete y los álabes de la Micro Turbina Kaplan utilizando ANSYS BladeGen, incorporando parámetros geométricos y operativos previamente calculados.
- Definición de las condiciones de contorno que representan escenarios reales de ríos de bajo caudal, con velocidades de flujo comprendidas entre 2 y 3 m/s, y considerando las características hidráulicas locales.

B) Simulación Numérica

- Integración del modelo geométrico en ANSYS CFX, configurando parámetros como modelos de turbulencia, calidad del mallado y condiciones de flujo estacionario.
- Configuración de dominios rotativos y estacionarios, para capturar con precisión la interacción entre el flujo y el rodete.

C) Recolección de Datos

- Obtención de parámetros clave como la distribución de presiones, velocidad del flujo, torque y coeficiente de potencia bajo diferentes alturas de caída de agua.
- Organización de los datos obtenidos en formatos accesibles y comparables para análisis posterior.

D) Análisis de Resultados

- Análisis de potencia generada, eficiencia y coeficiente de potencia en distintos escenarios operativos, con base en los resultados de la simulación.
- Comparación de los resultados obtenidos con referencias teóricas y estudios previos sobre Micro Turbinas Kaplan, para validar la precisión del modelo y las configuraciones propuestas.

E) Procesamiento de Datos

- Representación gráfica de los resultados mediante Tablas, gráficos y diagramas que faciliten la interpretación y permitan identificar tendencias y correlaciones.
- Uso de herramientas estadísticas para evaluar la relación entre las variables geométricas y operativas, como el torque y el coeficiente de potencia.

F) Validación y Conclusiones

- Comparación de los resultados obtenidos con referencias de investigaciones similares, para garantizar la confiabilidad del diseño propuesto.
- Identificación de mejoras en el diseño y operación de la Micro Turbina Kaplan, además de recomendaciones para futuras investigaciones.

La simulación numérica se realizó en estaciones de trabajo especializadas ubicadas en la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), equipadas con la licencia académica ANSYS Academic 2022, utilizando módulos como BladeGen, TurboGrid y CFX. Estas herramientas proporcionaron un entorno técnico avanzado, permitiendo realizar análisis rigurosos y detallados del comportamiento hidráulico de la Micro Turbina Kaplan bajo condiciones de bajo caudal.

El enfoque metodológico aplicado asegura la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos, contribuyendo al entendimiento integral del desempeño de la Micro Turbina Kaplan y validando su viabilidad en contextos operativos reales.

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 Kaplan.

2.1 Teoría de turbomáquinas

2.1.1 Triángulo de velocidades

(Hernández Alfaro, 2017) define el triángulo de velocidades mediante la ecuación

1.

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{u} \quad (1)$$

Los triángulos de velocidades se pueden definir en cualquier punto del transcurso del fluido a través de los alabes, principalmente se utiliza al igual que en la ecuación de Euler, a la entrada y salida de los alabes. Estos se observan en la Figura 1.

La ecuación de velocidades se define

$$\vec{c} = \text{Velocidad absoluta del flujo } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$\vec{u} = \text{Velocidad absoluta del rodete } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$\vec{w} = \text{Velocidad relativa del flujo respecto al rodete } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$\beta = \text{Ángulo entre las velocidades } \vec{u} \text{ y } \vec{w} \text{ (}^\circ\text{)}$$

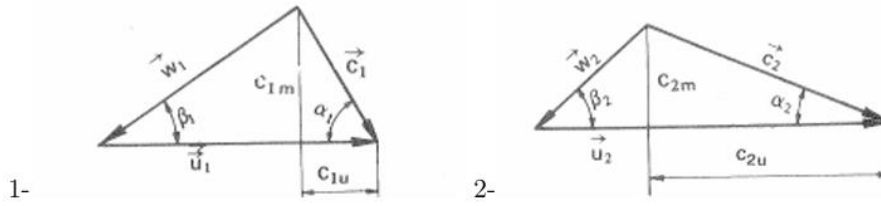
$$\alpha = \text{Ángulo entre las velocidades } \vec{c} \text{ y } \vec{u} \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$\vec{c_u} = \text{Componente tangencial de la velocidad absoluta del fluido } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$\vec{c_m} = \text{Componente meridional de la velocidad absoluta del fluido } \left(\frac{m}{s}\right)$$

Figura 1

Componentes de la velocidad y ángulos significativos en una Turbina Hidráulica



Nota: (Hernandez Alfaro, 2017)

2.1.2 Ecuación fundamental de las turbomáquinas

Conocida como la ecuación de Euler, resulta esencial en la investigación y creación de turbinas de agua. Esta fórmula representa la energía por cada masa intercambiada en la rueda. Se distinguen dos variantes de la ecuación de Euler (Peón Herrera, 2021):

2.1.2.1 Primera expresión de la ecuación de Euler

Para el análisis de este tema, se enfoca en la aplicación del principio de conservación de la cantidad de movimiento en un flujo de fluido, específicamente en el contexto de turbinas hidráulicas, asumiendo que la densidad se mantiene invariable en todas las circunstancias. La fórmula del mencionado teorema que se utiliza como base se presenta de la siguiente manera (Peón Herrera, 2021):

$$d\vec{F} = dQ \cdot \rho \cdot (\vec{c}_1 - \vec{c}_2) \quad (1)$$

A continuación, se analizan los momentos al ingresar y salir del rodete en relación con el eje este, lo que da como resultado el momento de las fuerzas externas de la siguiente forma (Peón, 2021):

$$dM = dQ \cdot \rho \cdot (c_1 \cdot r_1 \cdot \cos(\alpha_1) - c_2 \cdot r_2 \cdot \cos(\alpha_2)) \quad (2)$$

Se utiliza la teoría unidimensional, asumiendo que todas las partículas que alcanzan el rodete tienen una velocidad idéntica. Cuando las partículas salen del rodete, se espera que tengan una velocidad idéntica. Estas hipótesis se formulan. Al trabajar con un número limitado de álabes, dado que el fluido tiene las mismas características. La

rapidez de ingreso para todas las partículas que entran debe ser idéntica, al igual que para las restantes. Los picos sobresalientes hacen que las corrientes se desvíen en la misma dirección. Al realizar las simplificaciones mencionadas y al incorporar esta suposición en el planteamiento, se obtendrá (Peón Herrera, 2021):

$$c_{1u} = c_1 \cdot \cos(\alpha_1) \quad (3)$$

$$c_{2u} = c_2 \cdot \cos(\alpha_2) \quad (4)$$

$$M = Q \cdot \rho \cdot (c_{1u} \cdot r_1 - c_{2u} \cdot r_2) \quad (5)$$

Una vez que se desee alcanzar la forma inicial de la ecuación de Euler, será necesario determinar la energía que el fluido ha transferido al rodete. Este cálculo se logra al multiplicar la ecuación de momentos por la velocidad angular del rodete (Peón Herrera, 2021).

$$P = M \cdot \omega = \omega \cdot Q \cdot \rho \cdot (c_{1u} \cdot r_1 - c_{2u} \cdot r_2) \quad (6)$$

Es importante tener presente que la potencia generada por el rotor se calcula mediante la fórmula siguiente (Peón Herrera, 2021).

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (7)$$

Se cambia y simplifica:

$$Q \cdot \rho \cdot g \cdot H = \omega \cdot Q \cdot \rho \cdot (c_{1u} \cdot r_1 - c_{2u} \cdot r_2) \quad (8)$$

$$H = \omega \cdot \frac{(c_{1u} \cdot r_1 - c_{2u} \cdot r_2)}{g} \quad (9)$$

Una vez que se tiene en cuenta que, u es igual a ω multiplicado por r , se procede a reemplazarlo en la fórmula, obteniendo así la forma inicial de la ecuación de Euler utilizada en turbomáquinas (Peón Herrera, 2021).

$$H = \frac{(c_{1u} \cdot u_1 - c_{2u} \cdot u_2)}{g} \quad (10)$$

Al analizar la expresión obtenida, se observa la ausencia de una conexión directa entre la altura H y el líquido. Es importante resaltar que este análisis es pertinente específicamente para el funcionamiento de una turbina de agua, en caso de intentar

aplicarlo a bombas. Para resolver el problema de las ecuaciones hidráulicas, simplemente es necesario aplicar el valor negativo a la ecuación mencionada (Peón Herrera, 2021).

2.1.2.2 Otra manera de expresar la ecuación de Euler

En caso de que la precisión en la aplicación del triángulo de velocidades se vea afectada por un error en el diseño o circunstancias inusuales de trabajo, es factible recurrir al teorema del coseno, dado que esta igualdad geométrica se verifica de manera constante. Es importante tener presente la estructura del teorema del coseno, la cual se expresa de la siguiente manera (Peón Herrera, 2021):

$$w^2 = u^2 + c^2 - 2 \cdot u \cdot c \cdot \cos(\alpha) \quad (11)$$

Se realiza la transformación mencionada y luego se reemplaza en la fórmula inicial de la ecuación de Euler (Peón Herrera, 2021).

$$u \cdot c \cdot \cos(\alpha) = \frac{w^2 + u^2 + c^2}{2} \quad (12)$$

Como consecuencia de reemplazar la modificación previa, se obtiene la segunda versión de la ecuación de Euler para turbomáquinas (Peón Herrera, 2021).

$$H = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2 \cdot g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2 \cdot g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \cdot g} \quad (13)$$

Esta fórmula solo sería aplicable en el caso de las turbinas. Si se desea utilizarla para las bombas hidráulicas, bastará con modificar la señal en uno de los extremos (Peón, 2021).

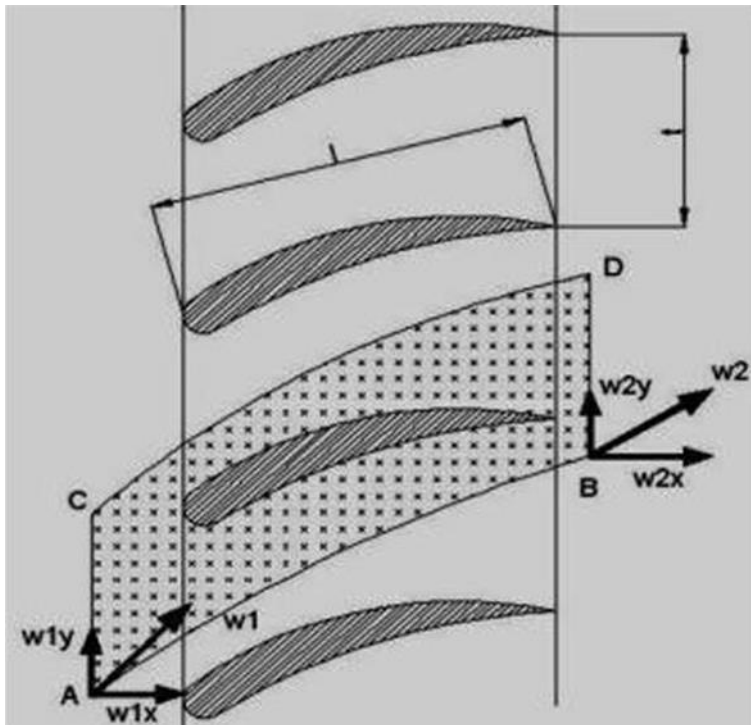
$$H = -\frac{u_1^2 - u_2^2}{2 \cdot g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2 \cdot g} - \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \cdot g} \quad (14)$$

2.1.3 Teoría de persianas de álabes

Como punto de partida, se seleccionará una parte específica del rodete, de manera que en ese plano se muestren las velocidades relativas del flujo y las áreas de los álabes. Esta representación se puede observar en la Figura 2, conocida como persiana de álabes (Peón Herrera, 2021).

Figura 2

Persianas de álabes



Nota: (Peón Herrera, 2021)

De acuerdo con la nomenclatura utilizada en la Figura 2, se observa que las líneas de corriente están representadas por AB y CD. Estas líneas mantienen una separación constante de $AC = BD$. Según lo estudiado hasta ahora, el flujo no pasará por los planos AB y CD, sino que se enfocará únicamente en los planos AC y BD. El caudal completo cruzará estos últimos planos, siendo idéntico para ambos. Así, las componentes de la velocidad relativa en la dirección x, según lo mostrado en la Figura 2, son equivalentes tanto al ingresar como al salir del álabe. Es necesario formular una ecuación que sume todas las intensidades de los vórtices presentes en la parte inferior de la curva del álabe. Esto permitirá obtener información sobre la solidez de la persiana y determinar el número de álabes en el rodete (Peón Herrera, 2021).

2.2 Turbina

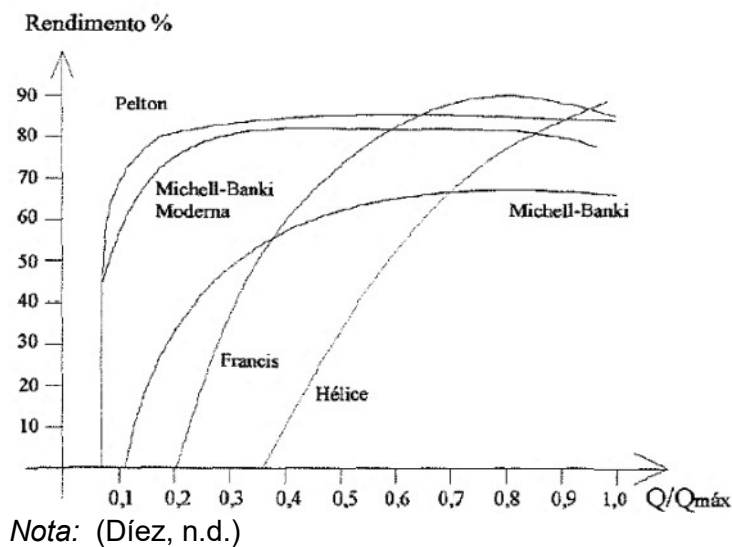
Una turbina es una máquina rotativa que convierte la energía potencial y cinética de un flujo de vapor, gas, o agua en energía mecánica. Los componentes fundamentales de una turbina incluyen el rotor, que está equipado con palas distribuidas a lo largo de su

circunferencia. Las palas, al interactuar con un fluido, generan un impulso que produce un movimiento tangencial. La energía mecánica resultante se transmite a través de un eje, permitiendo el accionamiento de una bomba o un generador.

La Figura 3 ilustra las características comunes de rendimiento en relación con las fluctuaciones de caudal de un conjunto de turbinas. Se puede notar que el rendimiento de la turbina hélice mejora conforme se reducen las desviaciones del caudal real respecto al caudal de diseño.

Figura 3

Eficiencia de las turbinas en relación con las fluctuaciones del flujo de agua



2.2.1 Partes de una turbina hidráulica

2.2.1.1 Generador

El generador es el componente principal que convierte la energía mecánica del movimiento del rotor en energía eléctrica. Utiliza el principio de inducción electromagnética para generar electricidad y está compuesto internamente por un estator y un rotor, bobinas de cobre y un núcleo de hierro (Ibañez Solis, 2019).

2.2.1.2 Estator

El estator, parte fija de la turbina, cumple una doble función. En el generador, contiene las bobinas que generan el campo magnético necesario para la inducción electromagnética. En las turbinas Kaplan y Francis, el estator también se refiere a las

guías fijas que dirigen el flujo de agua hacia los álabes del rotor, optimizando la eficiencia del sistema. Su diseño debe soportar la estructura del generador y proporcionar una trayectoria estable para el agua (Ibañez Solis, 2019).

2.2.1.3 Rotor

El rotor es una parte fundamental de la turbina hidráulica, caracterizada por su movimiento giratorio que permite la conversión de la energía del agua en energía mecánica. Dentro del generador, el rotor está rodeado por las bobinas del estator. A medida que el rotor gira, genera un campo magnético que induce una corriente en estas bobinas, esencial para la producción de electricidad (Ibañez Solis, 2019).

2.2.1.4 Eje del generador

El eje del generador desempeña un papel crucial al transmitir la energía mecánica generada por el rotor a los componentes internos del generador, donde se convierte en energía eléctrica. Para asegurar un funcionamiento eficiente y evitar problemas como vibraciones o pérdidas de energía, el eje debe ser robusto y estar alineado con precisión (Ibañez Solis, 2019).

2.2.1.5 Puertas (válvulas)

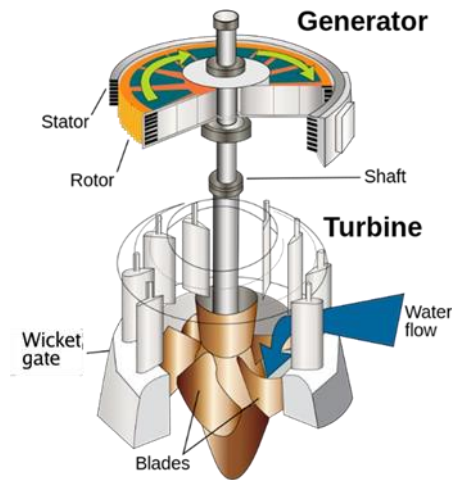
Las puertas o válvulas regulan el flujo de agua hacia la turbina, controlando la cantidad de energía hidráulica disponible para la conversión. Estas incluyen compuertas de admisión y válvulas reguladoras que pueden abrirse y cerrarse según la demanda de energía (Ibañez Solis, 2019).

2.2.1.6 Álabes de la turbina

Los álabes de la turbina capturan la energía cinética del agua y la transforman en energía mecánica de rotación. El diseño de los álabes varía según el tipo de turbina (Francis, Kaplan, Pelton) y está optimizado para maximizar la eficiencia en la conversión de energía. Generalmente, los álabes están fabricados con materiales resistentes a la corrosión y al desgaste, como el acero inoxidable (Ibañez Solis, 2019).

Figura 4

Partes de una turbina hidráulica



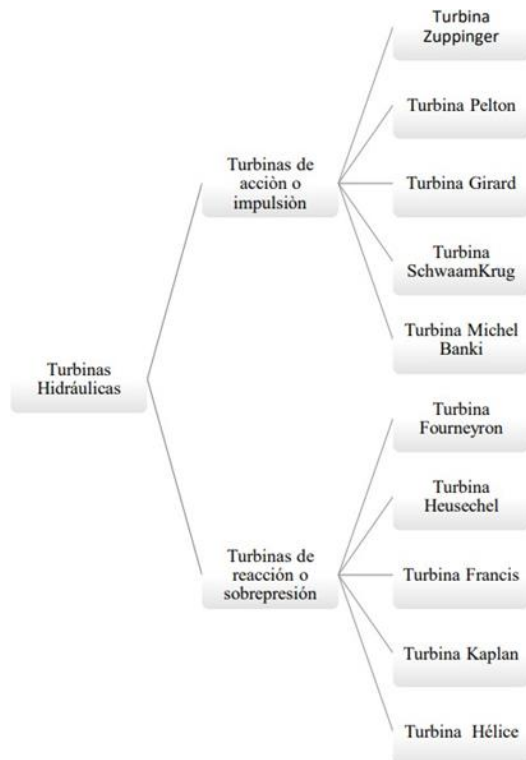
Nota: (Pinochet, 2015)

2.2.1 Clasificación de turbinas hidráulicas

En la Figura 5, las turbinas hidráulicas se clasifican según si la presión cambia o permanece constante en el rodete.

Figura 5

Clasificación de turbinas hidráulicas por la variación de presión

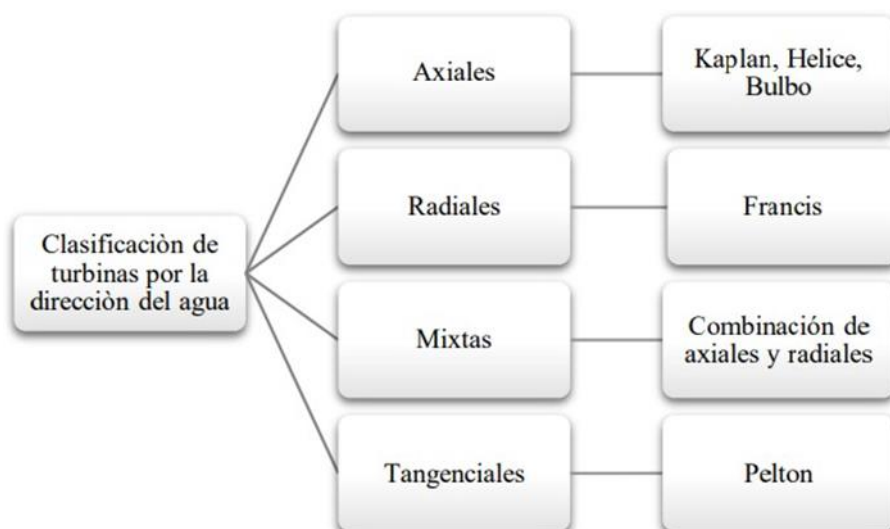


Nota: (Pinochet, 2015)

La Figura 6 presenta una clasificación de las turbinas basada en la dirección de entrada del fluido.

Figura 6

Clasificación de turbinas hidráulicas por la dirección del agua



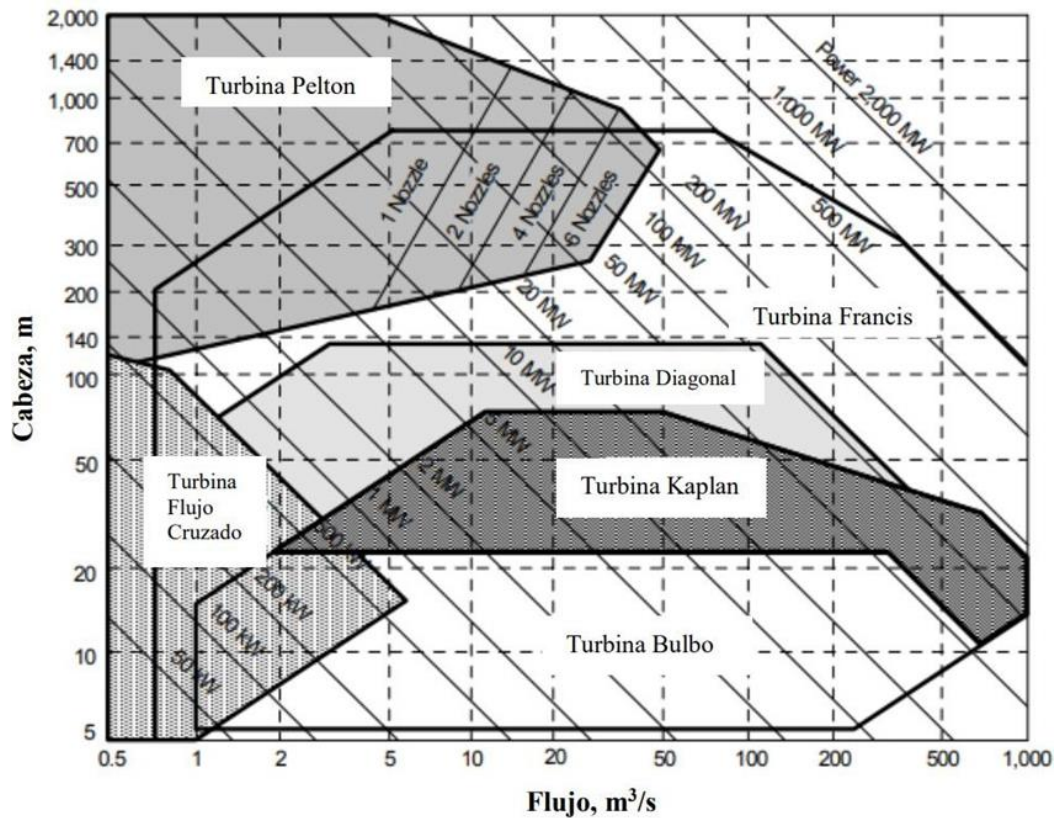
Nota: (Pinochet, 2015)

En la Figura 7 se presenta una representación detallada de los rangos operativos de diversas turbinas hidráulicas, incluyendo tanto las turbinas previamente mencionadas como otras adicionales. Esta Figura proporciona una visión clara de cómo cada tipo de turbina se comporta en función del flujo de agua y la altura de caída, dos parámetros en la generación de energía eléctrica. La turbina Francis, como se muestra en la Figura, tiene la capacidad de operar en un amplio rango de condiciones. Esto significa que puede manejar una variedad significativa de caudales y alturas, haciéndola versátil para diferentes aplicaciones. En contraste, la turbina Pelton está diseñada para operar eficazmente en un rango más específico, especialmente en situaciones de alta altura de caída. Su rendimiento óptimo se da en condiciones donde la energía potencial del agua es alta, lo que le permite ser eficiente en estos escenarios. Por otro lado, la Turbina Kaplan tiene un rango operativo más reducido en comparación con la Francis, pero sigue siendo capaz de operar dentro del rango de la turbina Francis. Esto implica que la Turbina Kaplan es adecuada para condiciones de flujo más bajas y alturas menores, y su selección puede

ser preferible en situaciones donde el caudal es alto pero la altura de caída es menor (Chavarro Lara, 2019).

Figura 7

Aplicación de diferentes turbinas



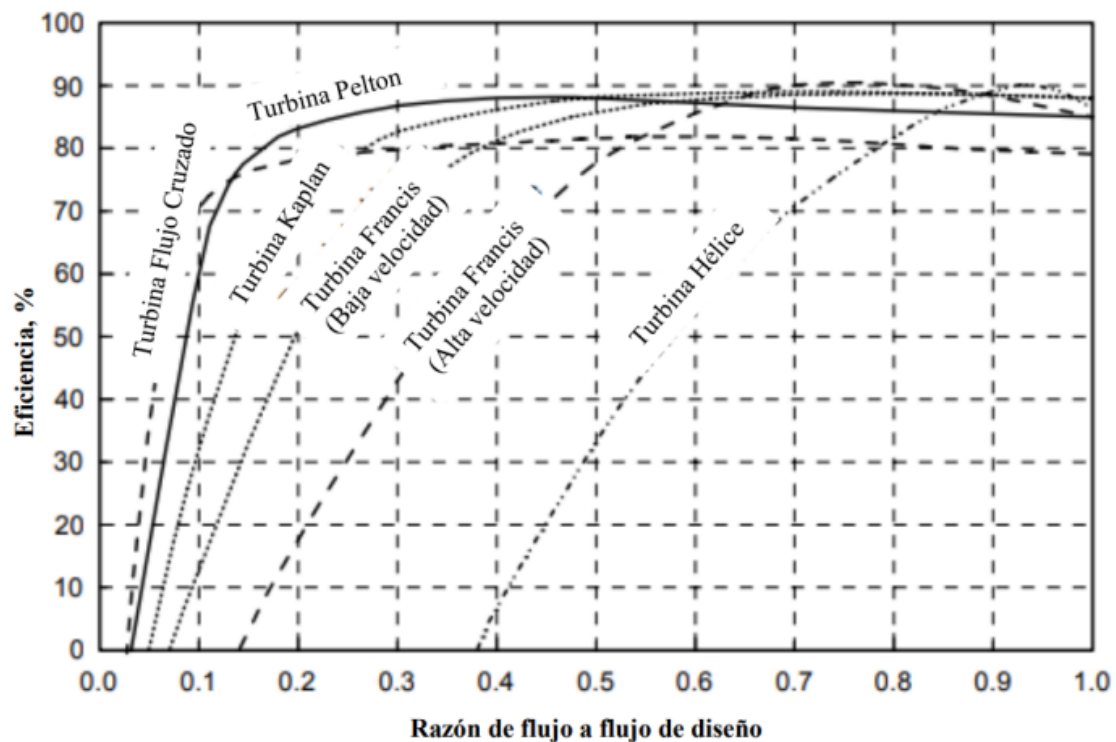
Nota: (Kaltschmitt et al., 2007)

En la Figura 8 se detallan los rendimientos de diferentes turbinas en función del flujo aplicado. La turbina Pelton presenta un rendimiento excepcionalmente alto y constante, alcanzando niveles de eficiencia notables a partir de un flujo del 20%. Esta turbina mantiene una eficiencia relativamente estable incluso cuando el flujo se incrementa más allá de este umbral, lo que la convierte en una opción eficiente para una amplia gama de condiciones de flujo. En comparación, la Turbina Kaplan exhibe una eficiencia similar a la de la Pelton, pero su rendimiento óptimo comienza a ser evidente solo cuando el flujo alcanza un 35%. A partir de este punto, la eficiencia de la Kaplan mejora significativamente con el aumento del flujo, lo que sugiere que es más adecuada para aplicaciones donde se puede garantizar un flujo relativamente alto. Por otro lado, la

turbina Francis muestra un rendimiento inferior en comparación con las turbinas Pelton y Kaplan hasta que el flujo alcanza al menos un 50%. Solo cuando el flujo llega a este nivel, la turbina Francis logra una eficiencia que se aproxima a la de las otras turbinas.

Figura 8

Rendimientos de diferentes turbinas en función del flujo aplicado



Nota: (Kaltschmitt et al., 2007)

2.3 Turbina Kaplan

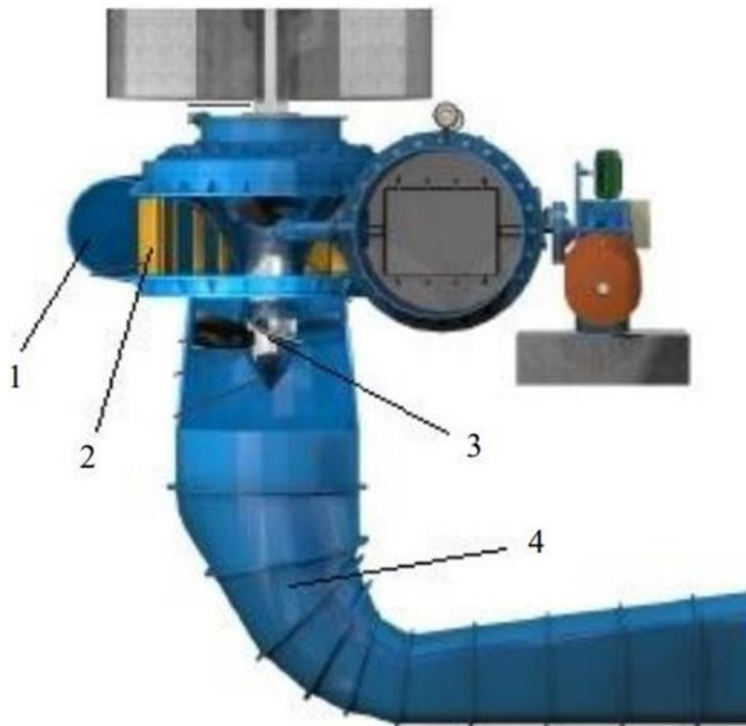
Las turbinas Kaplan, que constituyen el enfoque principal de este estudio, fueron diseñadas por el ingeniero austriaco Viktor Kaplan en 1913, basándose en investigaciones sobre las turbinas Francis. Estas turbinas se caracterizan por una caída en la presión del agua al entrar, y se clasifican como turbinas de sobrepresión o de reacción debido a este fenómeno (Abeykoon, 2022). Asimismo, cuentan con álabes ajustables que permiten optimizar la eficiencia al regular el flujo de agua en función de las necesidades de potencia (Nava Mastache, 2013).

Los cuatro componentes (ver Figura 9) de la Turbina Kaplan son los siguientes: la carcasa (1), que se encarga de transformar la energía de presión en energía cinética y

de proteger las partes internas de la turbina; el distribuidor (2), que dirige el flujo de agua hacia el rodete con la menor cantidad de pérdidas, utilizando sus palas móviles para mejorar la eficiencia; el rodete (3) es el componente central en el cual la energía cinética se transforma en energía mecánica mediante su rotación, ayudado por sus álabes. Además, el tubo de aspiración (4) dirige el flujo hacia la salida de descarga (Nava Mastache, 2013).

Figura 9

Elementos clave de la Turbina Kaplan



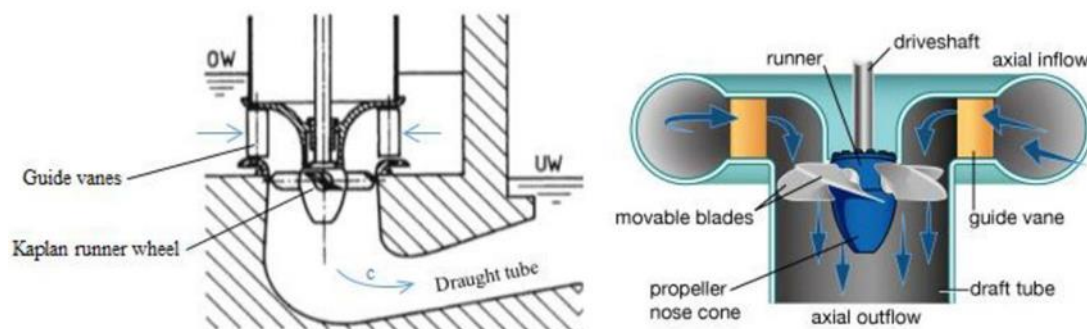
Nota: (Abeykoon, 2022)

Es de tipo de reacción y es adecuada para las estaciones hidroeléctricas que operan a bajas presiones (es decir, con bajas alturas) y también con caudales considerablemente mayores. Al igual que los rodetes Francis, los rodetes Kaplan también deben estar completamente sumergidos bajo el agua para funcionar correctamente. El agua, regulada por las paletas guía, golpea las palas del rodete axialmente con un cierto ángulo de ataque, como se muestra en la Figura 10. Cuando el caudal varía, las paletas guía ajustables son normalmente controladas por un mecanismo de regulación asociado con las variaciones del caudal. Además, estas paletas guía pueden cerrarse

completamente para detener el flujo de agua si es necesario. El agua entra y sale de la turbina en la dirección axial al eje. Al golpear el agua las palas de la turbina, la fuerza de reacción genera la rotación del rodete y luego el agua sale a través del tubo de aspiración. Los rodetes pueden tener palas fijas o ajustables. La disposición más común es con rodetes verticales (como se ilustra en la Figura 10), aunque también pueden colocarse horizontalmente o en una posición intermedia. Si el tubo de aspiración tiene una sección transversal uniforme, la velocidad del flujo es uniforme y, por lo tanto, el rodete podría colocarse en una posición adecuada del tubo de aspiración. En caso de que el rodete esté ubicado dentro del tubo de aspiración, las paletas guía también deben colocarse justo delante del rodete para guiar con precisión el flujo de agua. Sin embargo, si el tubo de aspiración es relativamente largo, el posible riesgo de cavitación puede aumentar debido al incremento de la altura (Dixon & Hall, 2010).

Figura 10

Esquema de la rueda del rotor y las paletas guía de una Turbina Kaplan



Nota: (Menny, 1995)

2.3.1 Clasificación de turbinas tipo Kaplan

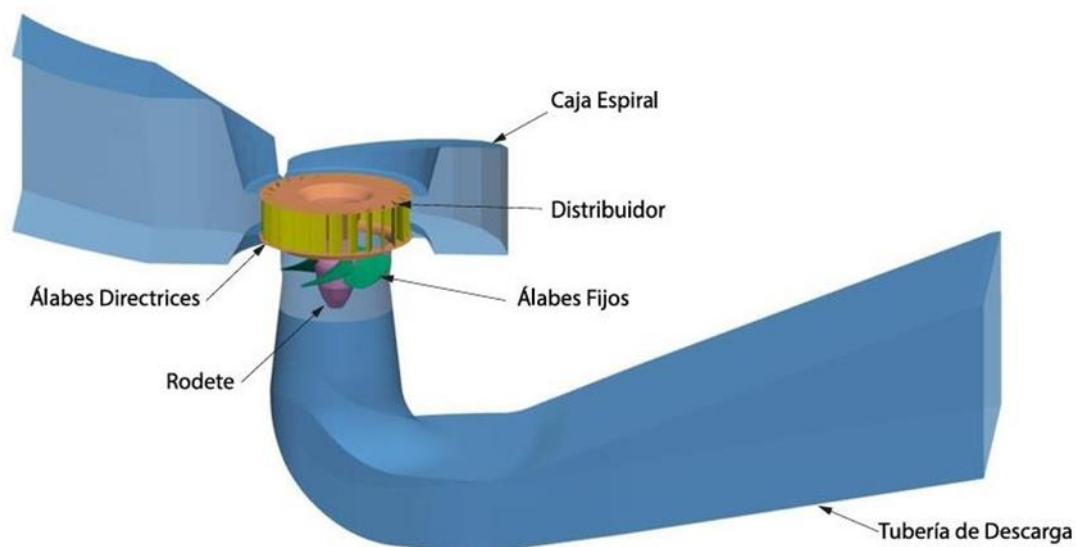
Las turbinas Kaplan se dividen en dos categorías: aquellas con regulación individual y aquellas con regulación doble. Las regulaciones individuales posibilitan ajustar los álabes del rotor para aumentar su velocidad de rotación, mientras que las turbinas con doble regulación facilitan tanto el ajuste de los álabes del rotor como la modificación de la apertura de los álabes guía. Según (Menny, 1995), el regulador simple solo cuenta con cuchillas de velocidad ajustables, mientras que el regulador doble dispone de un borde con velocidad adaptable y también de aspas guía móviles. La

Turbina Kaplan es adecuada para rangos de altura de 2 a 40 metros. La Turbina Kaplan de doble regulación opera en un rango más amplio en comparación con la versión compuesta, mientras que la turbina de regulación simple funciona en un rango más limitado. Es la ventaja principal de la turbina de doble regulación sobre la turbina de regulación única.

Actualmente, se ha introducido una modificación en las aspas del rotor, haciéndolas adaptables y permitiendo ajustar su ángulo de ataque. Esta innovación ha dado lugar a las turbinas conocidas como semi-Kaplan. La siguiente Figura ilustra las principales secciones de esta turbina (Aguilar Loayza & Guayasamín Betún, 2022).

Figura 11

Partes de la turbina semi-Kaplan



Nota: (Aguilar Loayza & Guayasamín Betún, 2022)

Las turbinas semi-Kaplan son elegidas por su costo reducido, pero para garantizar un rendimiento óptimo y minimizar problemas operativos, se requieren condiciones específicas para su funcionamiento. Esto significa que el flujo de trabajo debe ser constante, sin grandes fluctuaciones. Normalmente, esto se da en lugares donde los caudales están entre 3 m³/s y 30 m³/s, y las caídas netas varían de 1.5 a 20 metros. Estas turbinas tienen una eficiencia muy alta, aproximadamente entre el 90% y el 100%. Por esta razón, las plantas hidroeléctricas situadas en ríos con bajos desniveles han

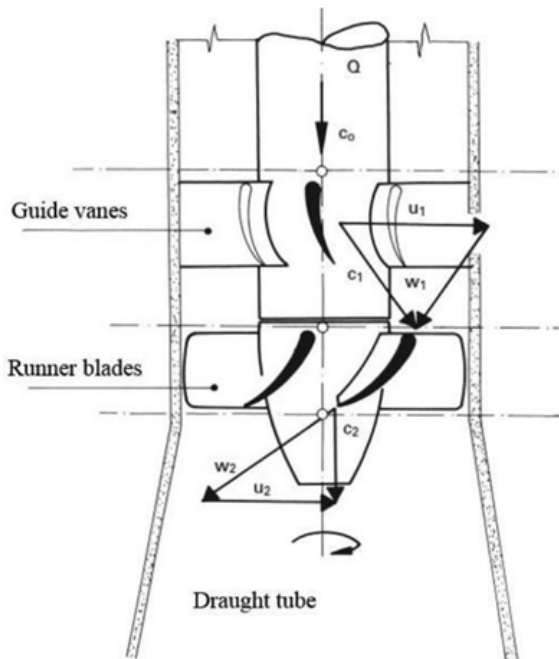
comenzado a adoptarlas recientemente para aumentar la producción de energía eléctrica (B. González & Suárez, 2001).

2.3.2 Paletas guía de una Turbina Kaplan

Las paletas guía juegan un papel importante en el diseño de turbinas altamente eficientes. Típicamente, las paletas guía están posicionadas justo encima del rotor (como se muestra en las Figuras 10 y 12) para lograr las mejores condiciones posibles de flujo hidráulico. El flujo de agua entra a la turbina de manera axial con una velocidad C_0 . La ergonomía de las paletas guía proporciona un giro al agua que fluye para golpear las palas del rotor con un cierto ángulo de ataque β_1 y una velocidad de flujo C_1 . Este giro creado por las paletas guía permite que el agua golpee las palas con una alta fuerza de reacción, promoviendo la rotación del rotor, por lo tanto, un ajuste adecuado de las paletas guía es crucial para la eficiencia de las turbinas. Usualmente, el ángulo con el que el agua ataca el rotor puede definirse como el ángulo de salida del agua que sale de las paletas guía (Abeykoon, 2022).

Figura 12

Diagrama esquemático que muestra la disposición de las palas del rotor y las paletas guía



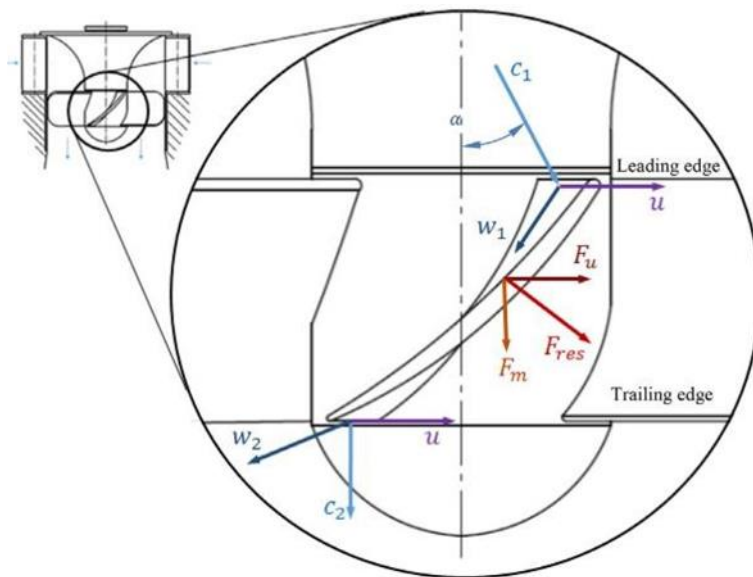
Nota: (Abeykoon, 2022)

2.3.3 Extracción de energía a través de un rotor Kaplan

El agua entra a la turbina con una velocidad absoluta C_0 y, debido a las paletas guía, el agua se tuerce y golpea las palas del rotor con una velocidad absoluta C_1 y un ángulo de ataque α . La energía extraída debido a la fuerza de reacción permite la rotación de la rueda con una velocidad de pala u , como se indica en la Figura 13. Se generará una fuerza resultante F_{res} en cada pala debido a la fuerza axial F_m y la fuerza tangencial F_u . Mientras tanto, ω_1 y ω_2 son las velocidades relativas en la entrada y salida de las palas, como se indica en la Figura 13. Finalmente, el agua sale de las palas del rotor de manera axial, con una velocidad C_2 en su borde de salida, a través del tubo de aspiración (Dixon & Hall, 2010).

Figura 13

Velocidades y fuerzas en un ángulo de la paleta del rodete de una Turbina Kaplan



Nota: (Abeykoon, 2022)

A medida que el agua pasa por el rotor, extrae la energía transportada por el agua en movimiento y, por lo tanto, la presión del agua disminuye significativamente. La diferencia de presión entre las entradas y salidas de la turbina puede definirse como ΔP . En la ecuación mostrada a continuación, nombrada en honor a Euler, define la cantidad de energía generada por un rotor de turbina (Prunner) resultante de la diferencia de velocidad tangencial en los flujos de entrada y salida de las palas (Abeykoon, 2022).

$$P_{runner} = m \cdot (u_1 \cdot c_1 - u_2 \cdot c_2) \quad (15)$$

Donde m es la tasa de flujo de masa del agua que fluye, y c_1 y c_2 son las velocidades tangenciales de entrada y salida, respectivamente (Abeykoon, 2022).

2.3.4 Mecanismo de regulación en las turbinas Kaplan

En la Figura 14 se ilustra el diseño del sistema de ajuste para las palas móviles del rotor, el cual se encuentra ubicado en el interior del cubo. Cada pala está conectada a través de un eje que entra en el cubo en un ángulo recto respecto al eje de rotación de la rueda. Cada eje de las palas gira alrededor de dos soportes, P_1 y P_2 , entre los cuales se encuentra una palanca L . Esta palanca es la encargada de ajustar la posición de la pala y está fijada al eje de la rueda. La fuerza centrífuga generada por la pala se transfiere a la palanca L a través de bieletas. En turbinas de gran envergadura, esta transferencia se realiza mediante un mecanismo de anillo integrado en el eje y respaldado por la palanca (Díez, n.d.).

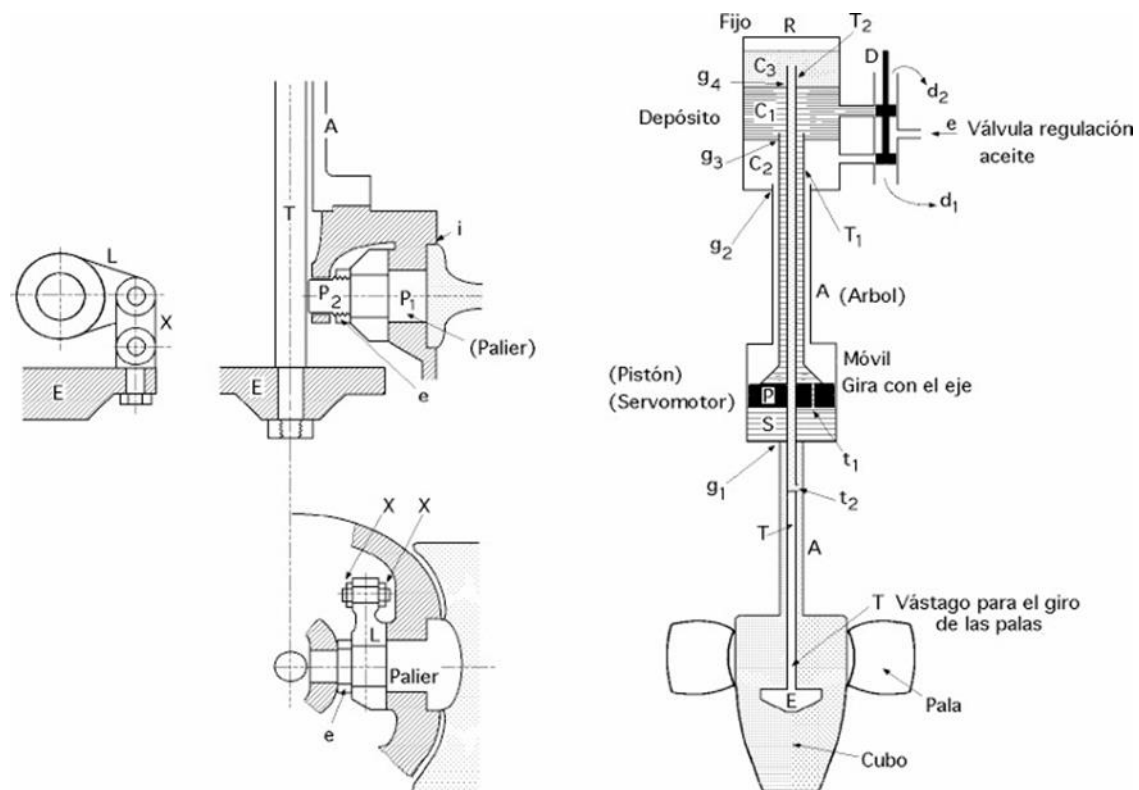
Las bieletas X , ubicadas en el extremo de la palanca L , están fijadas al eje mediante un soporte E . Este sistema es controlado por un vástago que atraviesa el interior del eje A ; cualquier movimiento axial de este vástago resulta en una rotación coordinada de todas las palas. Todo el sistema de ajuste se encuentra sumergido en aceite a una presión específica, que en los bulbos varía entre 2 y 3 atmósferas. Este aceite garantiza la lubricación adecuada para todos los cojinetes y conexiones, además de prevenir la entrada de agua en el interior del cubo (Díez, n.d.).

El vástago T es movido por un servomotor S que rota junto con el eje. Encima de este conjunto, se encuentra un depósito fijo R , donde las cámaras C_1 y C_2 están conectadas a una válvula de regulación de aceite D con una entrada y dos salidas. Dentro del árbol A se encuentran dos tubos concéntricos, T_1 y T_2 , que transportan aceite a presión. El espacio entre el árbol y el tubo T_1 conecta la cámara C_1 con la parte inferior del servomotor, utilizando el orificio t_1 perforado en el pistón P , que actúa directamente sobre el vástago de regulación T (Díez, n.d.).

Dado que se trata de componentes giratorios, es fundamental prevenir pérdidas o fugas de aceite en g_2 , g_3 y g_4 , ya que las distintas cámaras operan a diferentes presiones. Además, como el conjunto compuesto por el pistón P , el vástago T y los tubos T_1 y T_2 ubicados dentro del árbol A requiere lubricación, es crucial instalar una junta de sellado en g_1 . Esto evitará la conexión entre el interior del cubo de la rueda y la parte inferior del pistón P del servomotor, que opera bajo una presión variable (Díez, n.d.).

Figura 14

Mecanismo de regulación de las palas de una Turbina Kaplan



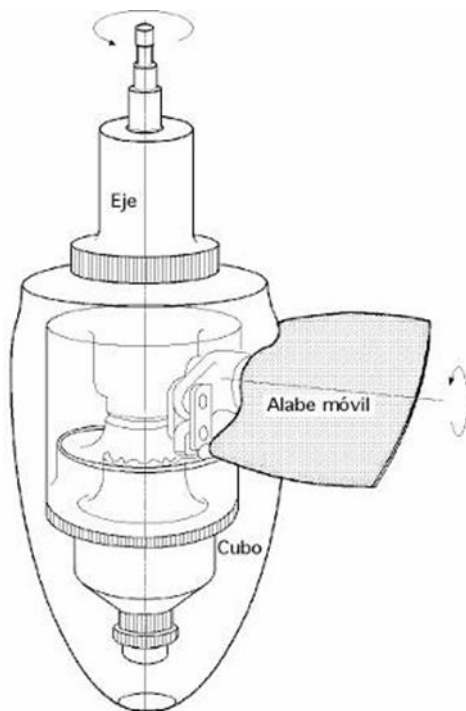
Nota: (Díez, n.d.)

Dependiendo de la posición del distribuidor de aceite D , una de las caras del pistón P puede conectarse con la entrada de aceite a presión desde la tubería e , mientras que el otro lado del pistón P se encuentra a la presión de descarga. El interior del tubo T_2 conecta la parte superior del depósito R (cámara C_3) con el interior del cubo de la rueda, a través de un orificio t_2 situado en la cruceta de mando T , que orienta las palas (Díez, n.d.).

Esta cámara C_3 , que se encuentra a presión atmosférica, alberga aceite a un nivel específico y actúa como un depósito de expansión para el aceite contenido en el cubo. El volumen de aceite en la cámara varía en función de la posición de las palas. Esta cámara debe colocarse a una altura que garantice una presión estática adecuada, asegurando así la presencia de aceite en el cubo y evitando que el agua entre en su interior. El servomotor S puede instalarse en cualquier posición del eje, ya sea en la parte superior, encima del alternador, entre el alternador y la turbina, o debajo del mecanismo de orientación de las palas, siempre que haya espacio disponible, como se ilustra en la Figura 15, entre otras posibles ubicaciones (Díez, n.d.).

Figura 15

Disposición del cubo y la pala (Kaplan)



Nota: (Díez, n.d.)

2.3.5 Importancia de las turbinas Kaplan

La relevancia de las turbinas Hélice y Kaplan en contextos de pequeños desniveles con grandes volúmenes de flujo las convierte en opciones ideales, tanto en Configuración horizontal como vertical. Dado su parecido con las turbinas Bulbo, que se utilizan en plantas maremotrices y en ciertas minicentrales hidroeléctricas, este breve

análisis busca ofrecer una visión clara de su operación y sus áreas de uso. El desarrollo hacia la creación de turbinas capaces de alcanzar mayores velocidades específicas (ns), superiores a 450, favorece el uso de turbinas Hélice y Kaplan. Esto se debe a que en las turbinas Francis, que operan con velocidades específicas alrededor de 400, la capacidad de dirigir y controlar el flujo de agua con precisión se ve limitada. El rodete está formado por un número reducido de palas dispuestas de manera similar a una hélice de barco. Cuando estas palas están fijas, se le conoce como turbina de hélice. Si, en cambio, las palas son ajustables, se le denomina Turbina Kaplan. En ambos tipos de turbinas, el movimiento de rotación ocurre en una sola dirección, lo que las convierte en turbinas irreversibles. Cuando las turbinas están equipadas con palas ajustables y pueden operar en ambos sentidos de rotación (turbinas reversibles), y además tienen la capacidad de funcionar como bombas de hélice impulsadas por el generador mismo, se les conoce como turbinas Bulbo (Díez, n.d.).

Por otro lado, las turbinas Kaplan están diseñadas especialmente para entornos con baja altura de caída. En un proyecto hidroeléctrico específico, los datos sobre la altura del agua y el caudal unitario permiten calcular la potencia esperada, lo que facilita la selección adecuada de la turbina (Demirbas, 2005).

2.4 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La CFD emergió entre las décadas de 1950 y 1960. En 1995, John D. Anderson hizo contribuciones significativas a este campo. CFD es una disciplina dentro de la Mecánica de Fluidos que emplea técnicas numéricas y algoritmos para estudiar y resolver problemas relacionados con el comportamiento y el movimiento de los fluidos (León Méndez et al., 2023).

En términos generales, el método consiste en dividir una región del espacio en una malla, segmentando dicha área en pequeños volúmenes de control. Posteriormente, se solucionan las ecuaciones de conservación discretizadas en cada uno de estos volúmenes, resolviendo de manera iterativa una matriz algebraica en cada celda. El

cálculo continúa hasta que el valor del residuo de las variables involucradas en el proceso, especificado durante la creación del modelo, se alcance. De manera alternativa, el proceso finaliza cuando, tras un número determinado de iteraciones, el experto observa visualmente que los residuos han alcanzado un estado de estabilidad (León Méndez et al., 2023).

Para (Meroney et al., 2016), la CFD es una técnica empleada para analizar el comportamiento de los fluidos en diversos sistemas. Esta herramienta resuelve las ecuaciones de conservación de momento, continuidad y energía mediante la utilización de métodos numéricos.

Gracias a los avances tecnológicos en computación, es posible resolver numéricamente las ecuaciones de conservación en dimensiones espaciales y temporales. Esto transforma a la CFD en una herramienta útil y eficaz. La CFD no solo facilita el diagnóstico de procesos, sino que también es esencial para el desarrollo de equipos. Ofrece visualizaciones precisas en 2D, 3D y en tiempo real de las propiedades de los fluidos, lo que disminuye considerablemente el tiempo y los costos relacionados con la ejecución de experimentos a gran escala (McNay & Hilditch, 2017).

Asimismo, las aplicaciones de la CFD son variadas, abarcando desde motores diésel (Delgado-mejia et al., 2014); y flujos multifásicos de gas-sólido (G. González et al., 2018); hasta intercambiadores de calor y turbomáquinas (Ardila Marín & Hincapié Zuluzaga, 2012). En el campo de la medicina, se ha empleado en el diseño de catéteres para hemodiálisis y en la investigación de aneurismas (Clark et al., 2015). También juega un papel importante en la industria de los hidrocarburos (Raynal et al., 2016).

Este tipo de modelo utiliza un enfoque euleriano y se basa en la discretización del medio continuo, lo que ofrece una alternativa rentable para simular fluidos de manera realista mediante la aplicación de soluciones numéricas a las ecuaciones que los rigen (Sayma, 2009).

Según (Díaz Pinilla et al., 2019), la CFD implica resolver numéricamente las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos de un sistema. Esto es imprescindible debido

a que hay escenarios de flujo en los cuales los métodos analíticos no pueden ser aplicados. Las ecuaciones de conservación son ecuaciones diferenciales parciales que carecen de especificación completa, lo que requiere el uso de correlaciones de cierre semiempíricas para su solución.

2.4.1 Aplicaciones de la CFD

La CFD resulta extremadamente valiosa en diversas industrias, sirviendo como una herramienta para ingenieros en diseño, producción y mantenimiento. Se aplica en una amplia variedad de campos, incluyendo la química, la industria aeroespacial, la metalurgia, la ingeniería eléctrica y el procesamiento de metales, entre otros. Además, se emplea extensamente en la evaluación de edificaciones para anticipar la circulación del aire y el confort interior. También es útil en el análisis de fenómenos ambientales relacionados con fluidos, como la dispersión de contaminantes en el aire o los vertidos en cuerpos de agua. Fundamentalmente, esta metodología permite abordar tres tipos principales de problemas, de acuerdo con (Cruz Gavilan et al., 2020):

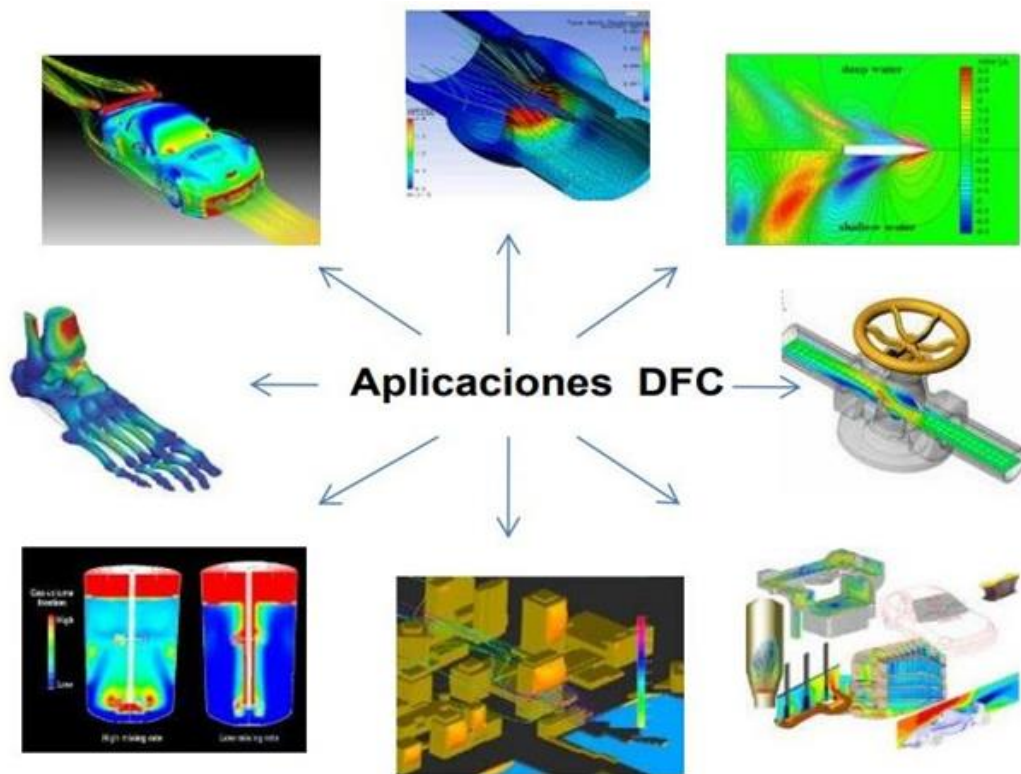
- Replica virtual de un sistema real para analizar posibles modificaciones en su funcionamiento o estructura, con el objetivo de optimizar recursos, elevar los estándares de calidad o reducir el impacto ambiental.
- Exploración de nuevas configuraciones y características en el diseño de equipos, abriendo camino a avances tecnológicos y soluciones más eficientes.
- Modelado computacional de sistemas complejos, abarcando desde fenómenos sencillos hasta interacciones multifásicas y multifísicas.

Por otra parte, la utilización de la CFD en entornos industriales, especialmente en el análisis de fluidos en tuberías, no solo necesita de las ecuaciones de transporte y de un modelo de turbulencia como los previamente indicados, sino que también requiere de modelos físicos adicionales. Esto se debe a que, en el contexto industrial, es infrecuente que un proceso involucre únicamente un solo fluido. Muchas aplicaciones de relevancia implican flujos que contienen múltiples fases (líquido-gas, líquido-sólido, líquido-líquido,

gas-sólido), lo que añade un nivel adicional de complejidad al análisis. En este sentido, se indica en la actualidad que no existe un modelo bifásico que pueda interpretar de manera precisa todos los tipos de flujos compuestos. Sin embargo, sí existen modelos diseñados para abordar casos específicos. Se identifican cuatro modelos esenciales para el análisis de fluidos bifásicos: el de fase discreta (DPM), el euleriano (Eulerian), el de mezcla (Mixture) y el de volumen de fluido (VOF). El modelo VOF se utiliza comúnmente para fases que no se mezclan entre sí, y en la literatura se observa que se aplica para analizar la turbulencia en flujos bifásicos (Liu et al., 2013)(Frank, 2005).

Figura 16

Aplicación de la dinámica de fluidos computacional



Nota: (Zambrano Meza, 2016)

2.4.2 Fases para resolver un problema en CFD

Para abordar un problema en CFD, generalmente es necesario realizar tres pasos fundamentales, que incluyen:

2.4.2.1 Pre-procesamiento

En esta fase, es crucial establecer los siguientes elementos del problema (Espinoza, 2008):

- Forma y estructura de las partes sólidas en contacto con el fluido.
- Canales por donde fluye el fluido, excluyendo las secciones de las superficies donde no hay fluido.
- La Configuración y dimensiones de los elementos en los que se subdividirá el dominio de flujo. El tamaño de estos elementos varía según la magnitud del problema; por ejemplo, para simular el flujo de aire alrededor de un edificio y evaluar las fuerzas del viento, se requiere un tamaño de celda mayor en comparación con el necesario para modelar el flujo en el impulsor de una bomba. La Configuración de los elementos estará influenciada por el tipo de malla empleada y por la geometría particular del problema en algunos casos.
- El proceso de mallado implica la subdivisión del campo de flujo continuo en elementos discretos con formas y tamaños especificados previamente. Mediante el uso de un algoritmo de mallado, se lleva a cabo este proceso, el cual puede incorporar optimizaciones, como el ajuste de la malla en zonas con alta curvatura o cerca de superficies sólidas (capa límite).
- Las condiciones de contorno especifican si la superficie es una pared física, una entrada o salida de fluido, o una pared de simetría virtual. En este contexto, es posible definir si una entrada o salida opera a presión constante, a velocidad constante, o según otras variables específicas.

2.4.2.2 Procesamiento

Este proceso implica solucionar el problema utilizando la geometría, el mallado y las condiciones de contorno definidos durante el preprocesamiento, lo cual incluye calcular los valores de velocidad, presión, temperatura y densidad en cada punto del campo de flujo. Para llevar a cabo el procesamiento, es necesario considerar varios

factores, entre los cuales se encuentran los siguientes (Naranjo Sanchete & Espinoza Román, 2008):

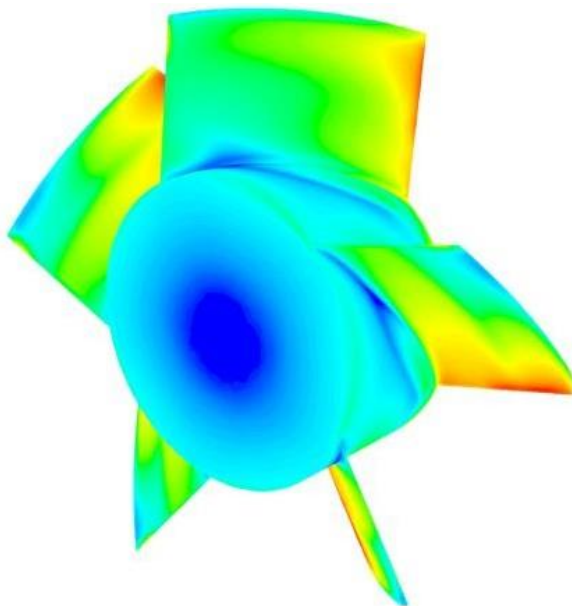
- Técnicas para la conversión de las ecuaciones de Navier-Stokes en formatos discretos.
- Modelos para la simulación de turbulencias, viscosidad y transferencia de energía.
- Métodos computacionales para la resolución de estos problemas.
- Estos temas serán abordados con mayor profundidad en las siguientes secciones, ya que un entendimiento adecuado de ellos es crucial para seleccionar las mejores opciones al enfrentar un problema específico.

2.4.2.3 Post-Procesamiento

Después de obtener los resultados de las propiedades del campo de flujo en cada punto de la malla, es posible presentar estos resultados de diversas maneras, como gráficos en 3D, líneas de corriente, mapas de velocidad o presión, Tablas, entre otros (Naranjo Sanchete & Espinoza Román, 2008). La imagen siguiente muestra un diagrama de contornos de presión del flujo de aire sobre las palas de un ventilador.

Figura 17

Resultado de post-procesamiento de un programa de CFD comercial



Nota: (Naranjo Sanchete & Espinoza Román, 2008)

2.5 Ríos

Definido como un curso natural de agua con un flujo continuo y constante, dotado de caudal y velocidad; en este artículo se sitúa en el contexto ambiental, viéndolo como un flujo o sistema de vectores energéticos que forma parte de un sistema mayor llamado "Ciclo Hidrológico del Agua". Este ciclo asegura la persistencia de intrincadas interacciones funcionales entre las diferentes formas de energía, manifestadas en el flujo líquido (océano), el flujo gaseoso (atmósfera), el flujo antiguo (litosfera) y los organismos vivos. Así, este componente vectorial (río) facilita la interconexión funcional de energía entre los tres estados de la materia y el cuarto estado plasmático, que se manifiesta como la energía solar (Campoblanco Díaz & Gomero Torres, 2000).

El río, en su curso, mueve materiales, nutrientes y energía esenciales hacia los ecosistemas situados río abajo (dimensión longitudinal) y a las áreas terrestres circundantes (dimensión transversal). La disposición de los sedimentos en el lecho del río permite que el agua se filtre, creando un área conocida como el hiporreo o río subterráneo. Este proceso contribuye a la auto-limpieza del agua y a la recarga de los acuíferos (dimensión vertical) (González Mora et al., 2014).

Figura 18

Dimensiones de la conectividad de un río



Nota: (González Mora et al., 2014)

En el marco de estas tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal, se desarrollan interacciones ecológicas, ecosistémicas y sociales. Las especies biológicas, incluyendo al ser humano, han adaptado sus historias de vida, procesos y actividades a la fluctuación de los caudales. Al tener en cuenta todos estos aspectos, es importante reconocer que un río es mucho más que simplemente un canal por donde fluye el agua. Es fundamental considerar que el río incluye áreas de gran relevancia ecológica (González Mora et al., 2014):

- La orilla del río y la llanura de inundación presentan gradientes de vegetación que varían según la afinidad de las plantas a la humedad a lo largo de la dimensión transversal.
- La zona hiporreica (parte inferior del río).
- Y un lecho fluvial que alberga una diversidad de microambientes para numerosas especies de flora y fauna.

Además, es esencial considerar que un río que mantiene su flujo natural y, por ende, conserva su funcionalidad original intacta, proporciona una amplia variedad de bienes y servicios ecosistémicos vitales para el desarrollo cultural, social y económico de las personas que viven en su cuenca (González Mora et al., 2014).

Figura 19

Perfil longitudinal de un río



Nota: (González Mora et al., 2014)

2.5.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se caracteriza como una región que se determina por el patrón de sus sistemas de drenaje. Esta área está delimitada por la línea de división de aguas, que marca el límite desde el cual las precipitaciones se dirigen hacia un punto determinado (Ávalos et al., 2013).

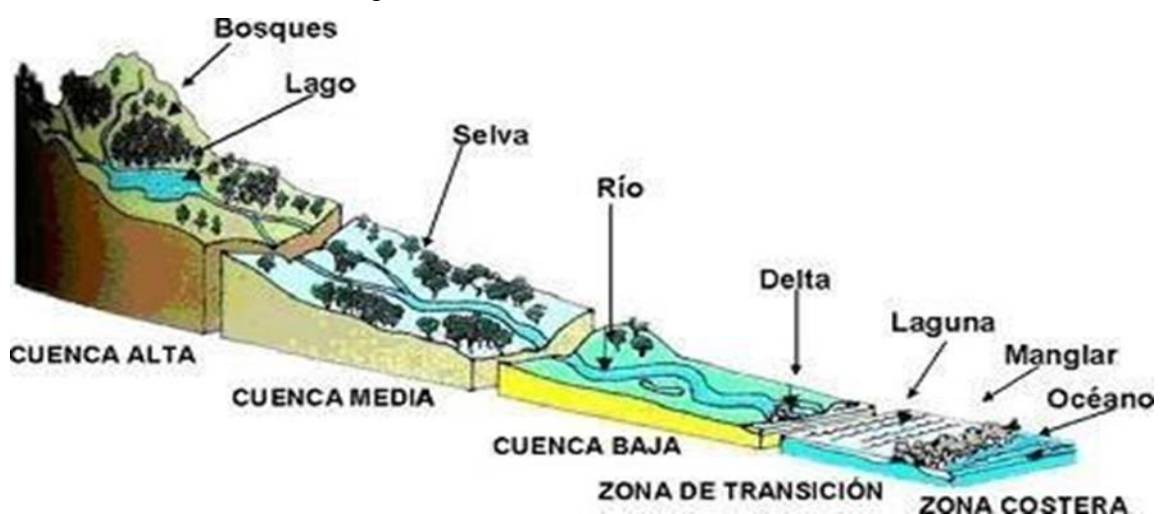
Los parámetros utilizados para definir las cuencas hidrográficas se basan en características tanto superficiales como en el relieve del terreno. La delimitación se realiza considerando la topografía, la cual determina un área específica en la que el agua de lluvia es dirigida hacia un punto de drenaje a través del proceso de escorrentía. El proceso por el cual el agua de lluvia se convierte en escorrentía que fluye hacia un punto determinado depende de las condiciones climáticas y geográficas del área en cuestión. Este proceso está influenciado por las características del suelo y la vegetación presente en la cuenca hidrográfica (Gaspari, 2007).

La Configuración de una cuenca influye directamente en su comportamiento hidrológico y en los caudales que pueden transportar sus cauces principales. Dependiendo de la forma particular de la cuenca, su comportamiento hidrológico puede variar. Para realizar análisis exhaustivos, es crucial tener en cuenta tanto los aspectos climáticos como los morfométricos. Los aspectos morfométricos pueden ser evaluados y comparados dentro de una misma área de estudio, lo que facilita la identificación de vínculos entre las características geométricas de la cuenca y su comportamiento en términos hidrológicos (Matovelle & Heras, 2020).

A medida que pasa el tiempo, se hace cada vez más evidente la importancia de contar con herramientas adecuadas para la administración de los recursos hídricos. La eficacia en la administración de los recursos hídricos se vuelve crucial debido al creciente consumo de agua y a la notable disminución de las lluvias a causa del cambio climático (Hernández Pasichana & Posada Arrubla, 2018). Hay una gran cantidad de herramientas de modelado disponibles para la gestión, pero su efectividad se ve limitada debido a la insuficiencia de datos necesarios para calibrar y ajustar adecuadamente el modelo. Examinar las propiedades morfométricas y identificar conexiones estadísticamente significativas entre ellas constituye un paso preliminar esencial para abordar el problema en cuestión (Mendez et al., 2015).

Figura 20

Partes de una cuenca hidrográfica



Nota: (Valdivielso, n.d.)

Según la dinámica del agua, es posible identificar tres áreas funcionales diferentes dentro de una cuenca (Ávalos et al., 2013):

- La zona de captación, de cabecera o cuenca alta. Estas zonas se encuentran cerca de la línea divisoria de aguas o en la parte más alta de la cuenca, e incluyen sistemas montañosos y colinas. En estas áreas, se originan los primeros flujos de agua (arroyos) una vez que los suelos han absorbido y retenido toda el agua posible según su capacidad.
- La zona de almacenamiento, de transición o cuenca media. Es una región de transición entre la parte superior e inferior de la cuenca, donde los flujos iniciales se unen, aportando caudales variados con diferentes niveles de sedimentos, contaminantes y materia orgánica, que dependen de las actividades realizadas en cada subcuenca. Esta zona actúa como un área de transporte y erosión.
- La zona de descarga, de emisión o cuenca baja. Es el lugar donde el río principal se encuentra con el mar o un lago. Esta área se distingue por albergar ecosistemas significativos, como los humedales terrestres y costeros, y es altamente productiva para la agricultura. Además, es donde se concentran los efectos de toda la cuenca.

2.6 Marco Conceptual: Definición de términos o conceptos

2.6.1 Turbina Kaplan

La Turbina Kaplan es un tipo de turbina axial que funciona por reacción y se asemeja a una hélice. Una de sus características distintivas es la posibilidad de ajustar la inclinación de las palas, lo que permite adaptar el rendimiento de la turbina a las variaciones del flujo. Gracias a este ajuste, las turbinas Kaplan pueden operar eficientemente incluso cuando el flujo se aparta del valor ideal (Combarro Marina, 2022).

2.6.2 Dinámica de fluidos computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una técnica que emplea modelos matemáticos para resolver las ecuaciones básicas relacionadas con el flujo de fluidos. Emplea técnicas numéricas para resolver las ecuaciones que describen la conservación de masa, momentum y energía en fluidos. Gracias a los avances recientes en tecnología informática y la disponibilidad de diversos programas, la CFD se ha establecido como una herramienta poderosa y eficiente para mejorar el diseño de productos (Ojeda Escoto et al., 2009).

2.6.3 Caudal

Cantidad de flujo de agua que pasa por un punto específico en un período determinado, crucial para el diseño de turbinas hidráulicas (Alarcón-Africano & Díaz-Suescún, 2018).

2.6.4 Simulación numérica

Proceso de resolución de ecuaciones matemáticas mediante métodos computacionales para predecir el comportamiento físico de sistemas, como el flujo de agua en una turbina (Laín Beatove, 2014).

2.6.5 Mallado en CFD

Para resolver las ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo de fluidos, es necesario dividir el dominio en áreas finitas con formas específicas, como triángulos o cuadriláteros en 2D, y tetraedros o hexaedros en 3D. Este proceso se conoce como mallado. La generación de estos elementos se realiza utilizando programas diseñados para crear mallas. Un factor crucial en el proceso de mallado es asegurarse de que el tamaño, la forma y la simetría de los elementos sean adecuados para los métodos numéricos que se van a emplear (Naranjo Sanchete & Espinoza Román, 2008).

2.6.6 Regulación de los álabes en turbinas Kaplan

Las palas de la Turbina Kaplan son ajustables, y al modificar su ángulo, cambian los triángulos de velocidad y otros parámetros. Si se inclinan las palas hacia una posición más horizontal, se reduce el flujo de agua, disminuyendo así la cantidad de agua que pasa y, en consecuencia, la velocidad de entrada.

Es crucial mantener constante la velocidad de rotación para asegurar la frecuencia adecuada del alternador en la turbina. Si los álabes se ajustan a una posición más vertical, el flujo de agua incrementa, lo que a su vez eleva la velocidad de entrada. Asimismo, la velocidad de rotación del rodete debe mantenerse estable para conservar la frecuencia del alternador (Hervás Ortega, 2019).

2.6.7 Turbina de hélice

Las turbinas de hélice son un tipo de turbina axial, donde el flujo de agua pasa en dirección paralela al eje de rotación. Son similares a una hélice de barco, con varias palas fijas unidas a un cubo central. Se utilizan comúnmente en plantas hidroeléctricas con caídas de agua bajas y grandes caudales. Se emplean en ríos y canales con poca altura de caída, pero con un gran volumen de flujo, como en estaciones de bombeo y generación de electricidad en ríos de curso bajo (Ramos Huatarongo et al., 2020).

2.6.8 Turbina de bulbo

La turbina de bulbo es un tipo de Turbina Kaplan (una variación de la turbina de hélice) en la que el generador está ubicado dentro de un bulbo sumergido. Esto permite una Configuración más compacta y reduce la necesidad de obras civiles complejas. Es adecuada para sitios con baja altura de caída y gran caudal, y se utiliza en proyectos hidroeléctricos en ríos de curso bajo y centrales mareomotrices (Góngora Cruz & Rojas Macedo, 2019).

2.6.9 Turbina Francis

La turbina Francis es una turbina de reacción y flujo mixto, donde el agua entra radialmente hacia el rodete y sale axialmente. Es adecuada para un rango medio de

alturas de caída y caudales. Es una de las turbinas más utilizadas en plantas hidroeléctricas por su eficiencia y adaptabilidad a diferentes condiciones de operación. Se emplea en presas y ríos con alturas de caída media y grandes caudales (Gallego Betancur, 2006).

2.6.10 Turbina Pelton

La turbina Pelton es una turbina de acción que convierte la energía cinética del agua en energía mecánica mediante cucharas montadas en el perímetro de una rueda. El agua impacta las cucharas a alta velocidad, lo que hace girar la rueda.

Se utiliza en sitios con grandes alturas de caída y bajos caudales. Es ideal para plantas hidroeléctricas en zonas montañosas con altas diferencias de altura (Mallitásig Panch, 2008).

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA TESIS

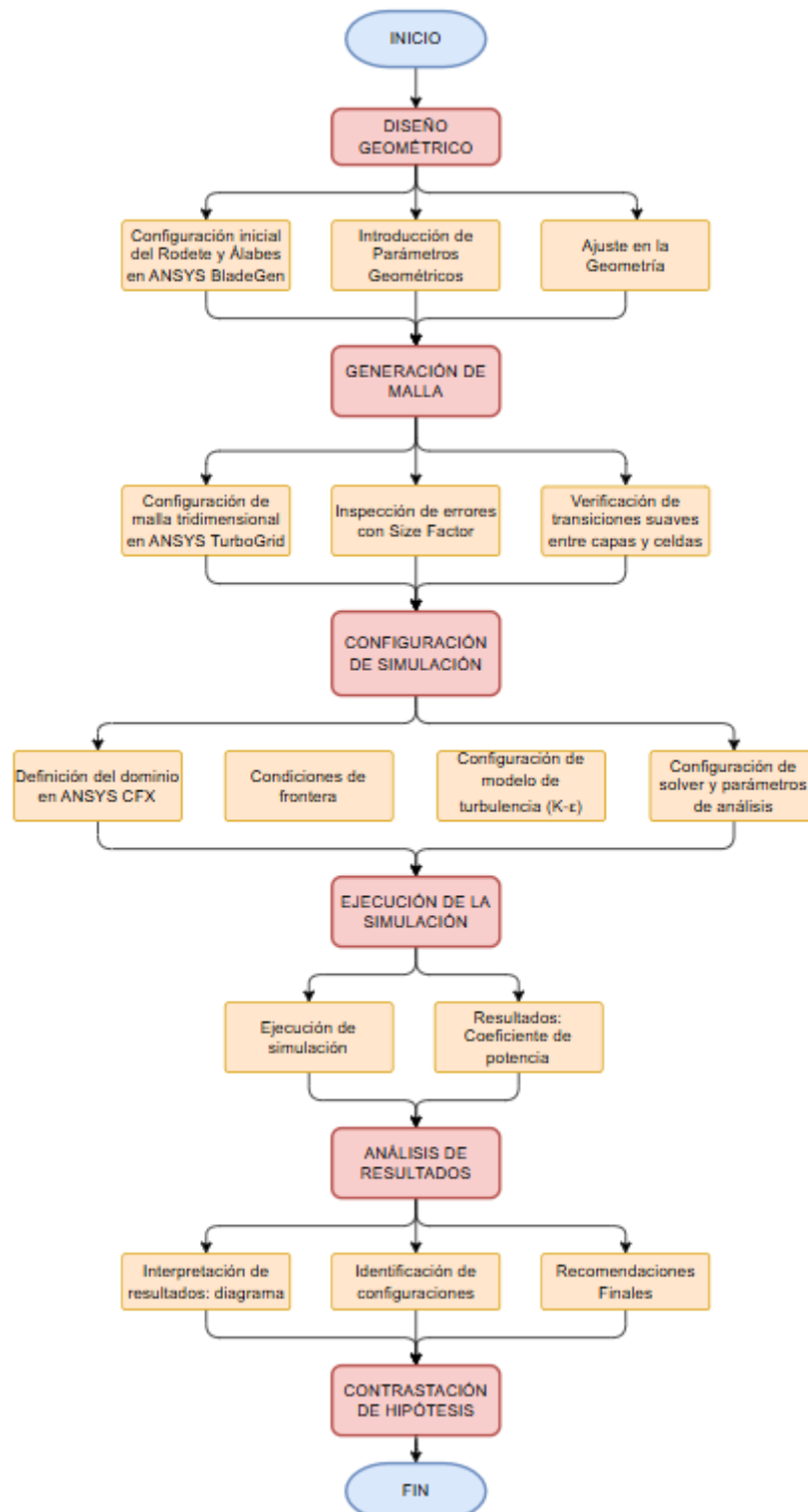
En este capítulo se detalla el proceso de diseño, modelado de la Micro Turbina Kaplan para ríos de bajo caudal para su análisis, utilizando herramientas de simulación numérica. Se describe la geometría de la turbina, incluyendo sus componentes principales y dimensiones, así como los parámetros que influyen en su desempeño, como la velocidad angular y el coeficiente de potencia. Además, se aborda el proceso de modelado en dinámica de fluidos computacional (CFD), abarcando desde la Configuración del dominio y el enmallado hasta las condiciones de contorno aplicadas. Este desarrollo proporciona la base técnica para los análisis y resultados presentados en los capítulos posteriores.

Las Micro Turbinas Kaplan son una de las tecnologías más utilizadas en sistemas hidroeléctricos debido a su adaptabilidad a flujos de baja altura de caída y su alta eficiencia energética. Este capítulo detalla el proceso de diseño, modelado y simulación de una Micro Turbina Kaplan utilizando herramientas avanzadas de ANSYS, como BladeGen, TurboGrid y CFX. Cada etapa del desarrollo se realiza con un enfoque sistemático para optimizar tanto el diseño geométrico como el análisis de rendimiento bajo condiciones operativas reales.

El propósito de este capítulo es proporcionar un esquema integral del modelado y análisis de una Micro Turbina Kaplan, desde su Configuración geométrica hasta la evaluación de su desempeño mediante simulación numérica. Las herramientas utilizadas permiten obtener resultados confiables que sirven como base para evaluar y optimizar la eficiencia de la turbina bajo diversas configuraciones de operación.

Figura 21

Diagrama de flujo del proceso de simulación



3.1 Configuración Geométrica con ANSYS BladeGen

La primera etapa del desarrollo consiste en la generación de la geometría del rodete y los álabes de la Micro Turbina Kaplan. Utilizando ANSYS BladeGen (ANSYS, 2015a), se definen los parámetros geométricos esenciales, como el número de álabes, el perfil aerodinámico y las dimensiones clave del rodete, basados en cálculos hidrodinámicos previos.

A) Consideraciones geométricas

- **Número de álabes:** La Micro Turbina Kaplan diseñada cuenta con seis álabes ajustables para maximizar la adaptabilidad a variaciones en el flujo.
- **Perfil del álabes:** Se seleccionó un diseño optimizado para reducir turbulencias y minimizar pérdidas de energía en el flujo.
- **Diámetro del rodete:** Definido en función de las condiciones del flujo y la potencia requerida, asegurando un equilibrio entre eficiencia y estabilidad operativa.

Las Figuras 22 y 23 ilustran la Configuración inicial del modelo en BladeGen, destacando la disposición geométrica del rodete y los álabes.

Figura 22

Configuración inicial del modelo 3D de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen



Figura 23

Renderizado 3D de los álabes de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen

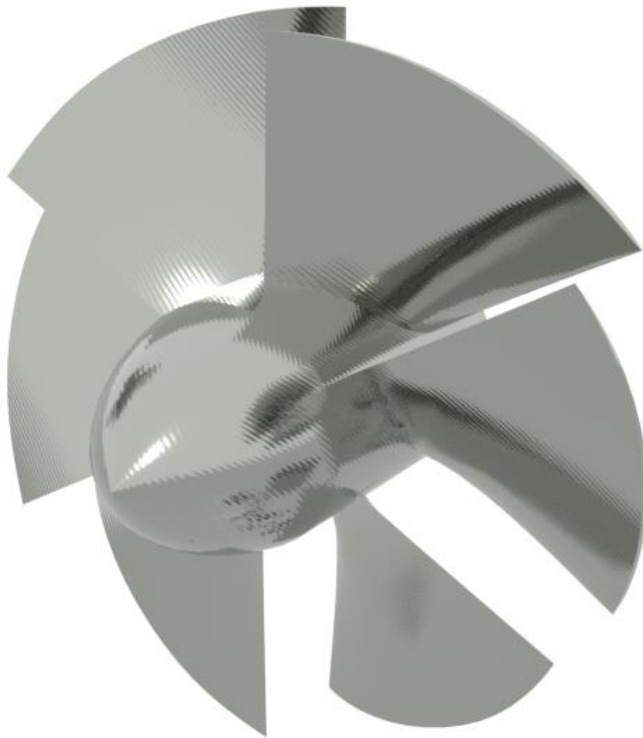


Figura 24

Vista de corte y dimensiones de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen

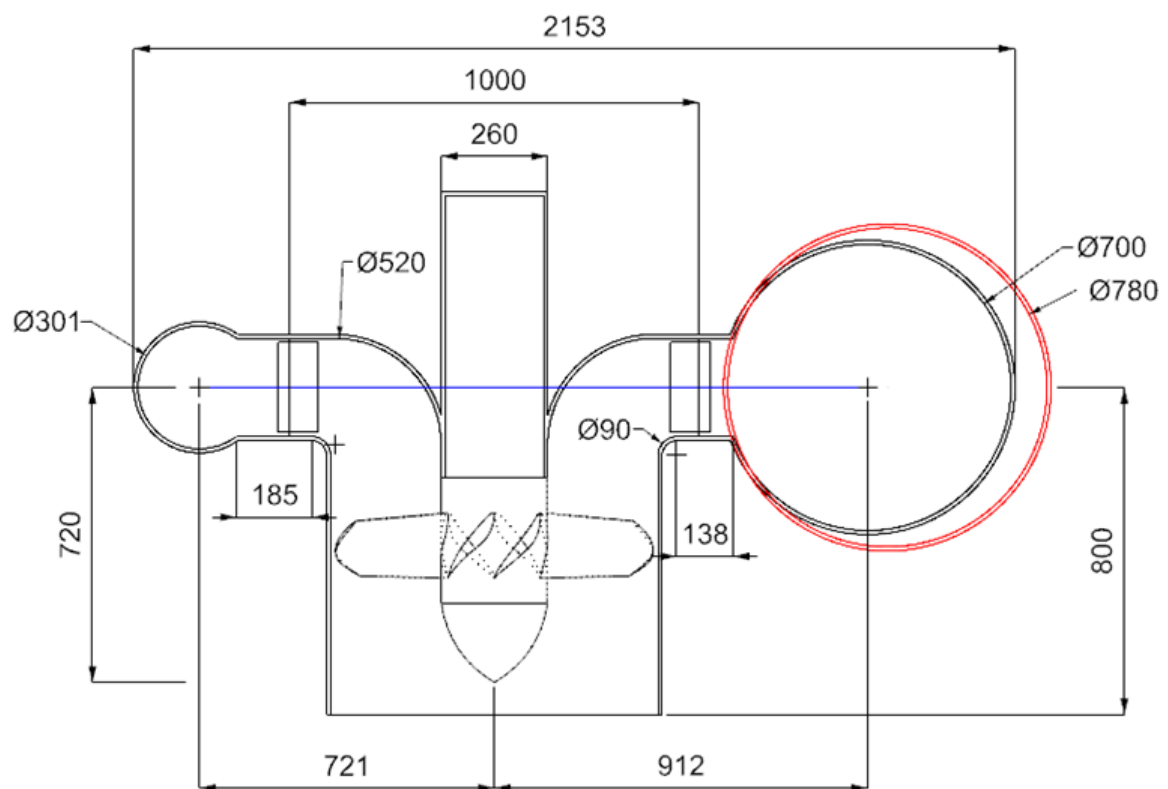
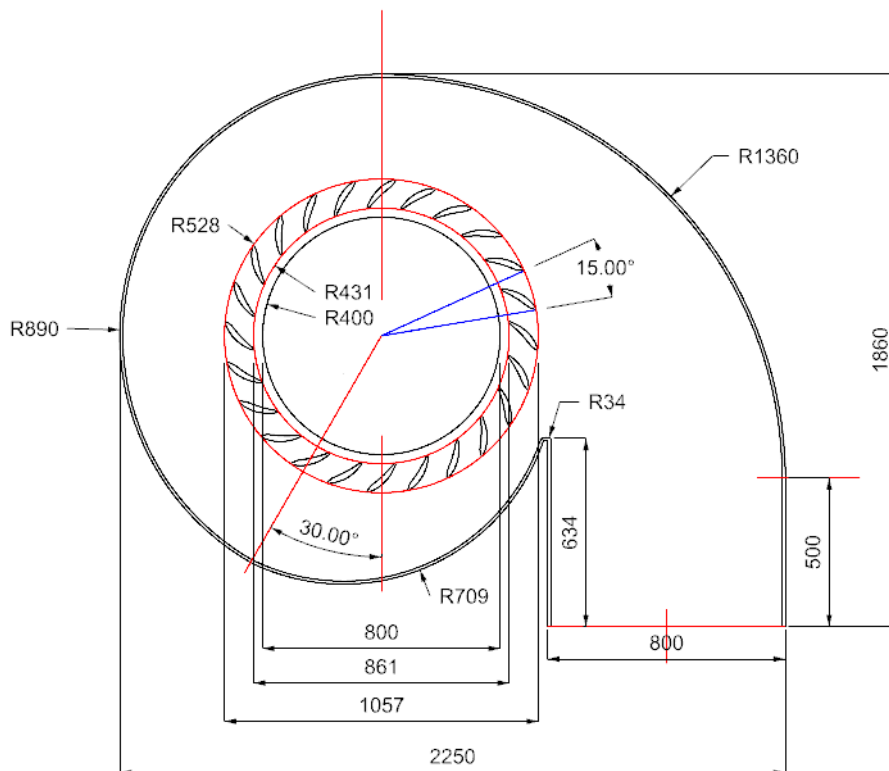


Figura 25

Vista de planta y dimensiones de la Micro Turbina Kaplan en BladeGen



3.2 Diseño y simulación de la Micro Turbina Kaplan

En este apartado se presentan los fundamentos esenciales del proyecto, incluyendo los cálculos geométricos y operativos necesarios para el modelado del rodete y los álabes de la Micro Turbina Kaplan. Además, se abordan los cálculos adicionales que incrementan la precisión del diseño, como los relacionados con la geometría de la carcasa en espiral y el tubo de aspiración, componentes críticos para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema hidráulico.

El software seleccionado para este análisis es ANSYS Workbench, una herramienta avanzada de simulación que integra aplicaciones especializadas para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. Dentro de este entorno, se emplearon BladeGen para el diseño geométrico del rodete y sus álabes, y CFX para la simulación fluidodinámica detallada. En las siguientes secciones, se describen los procedimientos, parámetros y configuraciones utilizadas para cada etapa del proyecto.

3.2.1 Flujo de Trabajo en ANSYS Workbench

El desarrollo del diseño y simulación se estructuró en un flujo de trabajo específico, organizado en los siguientes pasos:

A) Modelado del Rodete y Álabes

- La geometría del rodete y los álabes se generó en BladeGen, tomando como referencia los cálculos hidráulicos realizados previamente.
- Se definieron parámetros clave, como el número de álabes (seis), el diámetro del rodete (0.775 m), y los perfiles aerodinámicos ajustados para minimizar las pérdidas de energía.

B) Diseño de la Carcasa en Espiral y el Tubo de Aspiración

- Se desarrolló un modelo tridimensional que garantiza un flujo uniforme hacia el rodete, optimizando la captación y evacuación del agua.
- La carcasa en espiral fue diseñada con secciones transversales variables para distribuir el flujo de manera uniforme alrededor del rodete, mientras que el tubo de aspiración fue optimizado para reducir las pérdidas de presión en la salida.

C) Configuración del Análisis CFD

- Se definió el dominio computacional que incluye el rodete, la carcasa en espiral, el tubo de aspiración y el fluido circundante.
- Las propiedades del fluido (agua) se establecieron con una densidad de $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ y una viscosidad dinámica de $\mu=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.
- Las condiciones de contorno incluyeron:
 - **Entrada:** Velocidad uniforme de $U=2.5 \text{ m/s}$.
 - **Salida:** Presión constante igual a la atmosférica.
 - **Paredes:** Superficies no deslizantes para modelar la interacción fluido-estructura.

3.2.2 Configuración de la Simulación

El análisis del rendimiento de la Micro Turbina Kaplan se realiza mediante ANSYS CFX (ANSYS, 2015b), un software especializado en el estudio de turbomáquinas. Este módulo permite simular el flujo a través del rodete y evaluar parámetros clave, como el coeficiente de potencia y el torque generado.

A) Consideraciones para la simulación

- **Dominio computacional:** Incluye el rodete de la turbina y el fluido circundante, representando condiciones operativas reales.
- **Condiciones de frontera**
 - Entrada: Velocidad uniforme del flujo (2.5 m/s).
 - Salida: Presión atmosférica constante.
 - Paredes: Superficies no deslizantes para modelar la interacción entre el fluido y los componentes sólidos.
- **Modelo de turbulencia:** Se utiliza el modelo SST (Shear Stress Transport) para capturar con precisión los efectos de la turbulencia en el flujo.

3.2.3 Resultados Esperados

El diseño y simulación tienen parámetros de evaluación inherentes a la simulación:

- **Distribución de presiones:** La simulación analiza las áreas críticas en los álabes y carcasa donde se concentran las mayores cargas hidráulicas.
- **Coeficiente de potencia (C_P):** La simulación determina la eficiencia de conversión de energía hidráulica en mecánica.
- **Torque generado:** La simulación analiza el impacto de la geometría y las condiciones de contorno en el desempeño de la turbina respecto al torque.

Los resultados generados por el software de simulación incluyen análisis relacionados con el comportamiento fluido-estructural de la turbina. Sin embargo, el presente estudio se centrará exclusivamente en los resultados del coeficiente de potencia, dejando de lado los aspectos estructurales. Esto se debe a que el análisis estructural

requiere una evaluación específica de las propiedades mecánicas del material y su capacidad para soportar las condiciones de operación establecidas, lo cual excede el alcance de esta investigación y será considerado en futuros estudios.

3.3 Modelado del Rodete

El primer paso consiste en la creación del modelo del rodete, que constituye el componente principal del análisis hidráulico. Para este propósito, se utilizó el módulo BladeGen de ANSYS, una herramienta especializada en el diseño de rodetes para turbomáquinas, que permite generar modelos detallados con precisión y eficiencia. Este software facilita la definición de las regiones de entrada, salida y los álabes del rodete, agilizando el proceso al requerir únicamente la introducción de parámetros clave previamente calculados.

El diseño del rodete se fundamenta en los cálculos geométricos realizados previamente, ajustados y optimizados para las condiciones específicas del proyecto. Estos cálculos, detallados en el ANEXO B, sirvieron como base para configurar el modelo en BladeGen, seleccionando la opción normal axial, adecuada para Micro Turbinas Kaplan que operan con flujos predominantemente axiales.

3.3.1 Parámetros Introducidos

Los siguientes parámetros geométricos, esenciales para el diseño del rodete, fueron definidos en el software:

- A) **Radio Interior:** Representa la distancia desde el eje central hasta el borde más cercano del rodete, influyendo en la estabilidad del flujo en la región de entrada.
- B) **Radio Exterior:** Define la distancia desde el eje central hasta el borde más alejado del rodete, determinando el diámetro operativo y la capacidad de captación de energía del flujo.
- C) **Altura del Álabes:** Indica la dimensión vertical de los álabes entre los radios interior y exterior, crucial para optimizar el perfil hidráulico y minimizar pérdidas por turbulencia.

Estos parámetros garantizan que el modelo generado cumpla con las proporciones necesarias para un desempeño óptimo bajo las condiciones operativas establecidas.

3.3.2 Configuración del Modelo

En el proceso de modelado:

- A) Selección del Tipo de Turbina:** Se configura la turbina como un modelo axial, dado que este diseño es el más adecuado para flujos predominantemente paralelos al eje de rotación. Las unidades empleadas durante todo el desarrollo se mantuvieron en el Sistema Internacional (SI), garantizando la uniformidad y precisión en los cálculos.
- B) Propiedades del Modelo:** Las propiedades del rodete se definieron considerando su interacción con el fluido, enfocándose en optimizar la eficiencia del sistema. Estas propiedades están relacionadas con la configuración geométrica y operativa del rodete, sin abordar aspectos mecánicos estructurales, los cuales requieren un análisis independiente.
- C) Optimización del Diseño:** El software BladeGen realiza ajustes en el diseño inicial, mejorando el perfil aerodinámico de los álabes. Este proceso de optimización minimiza las pérdidas energéticas causadas por turbulencias y fricción, maximizando la eficiencia en la conversión de energía hidráulica en mecánica.

El modelo del rodete generado en BladeGen será exportado como base para realizar simulaciones fluidodinámicas en módulos especializados de ANSYS Workbench, como CFX. Estas simulaciones permitirán analizar parámetros clave del sistema, incluyendo la distribución de presiones en los álabes, la velocidad del flujo en distintas condiciones operativas y el coeficiente de potencia, proporcionando una evaluación integral del rendimiento hidráulico del diseño propuesto.

Figura 26

Configuración inicial del modelo del rodete en BladeGen

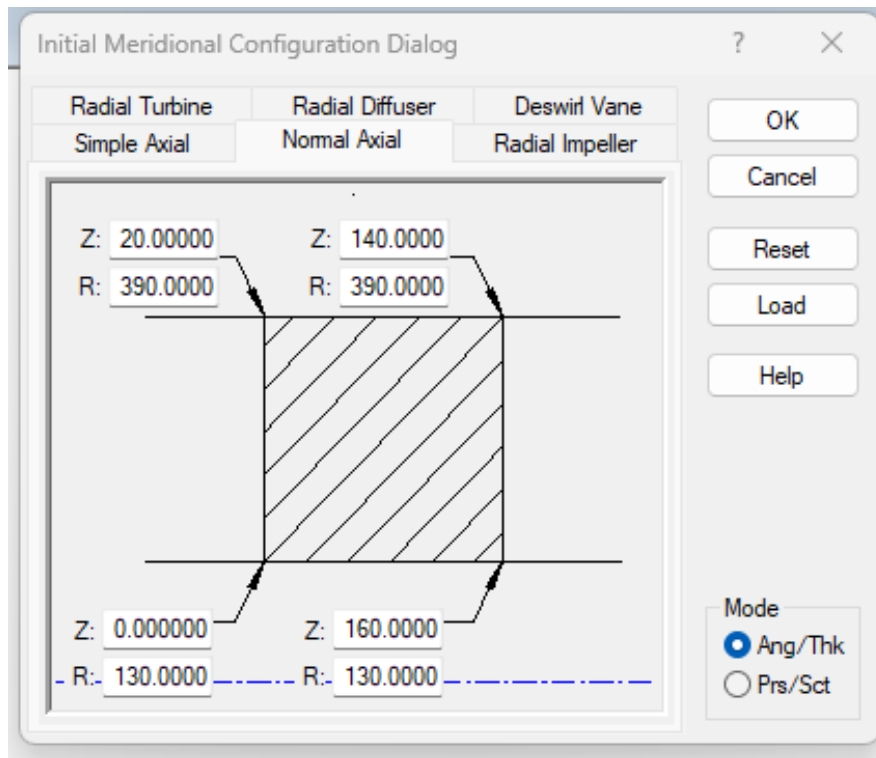
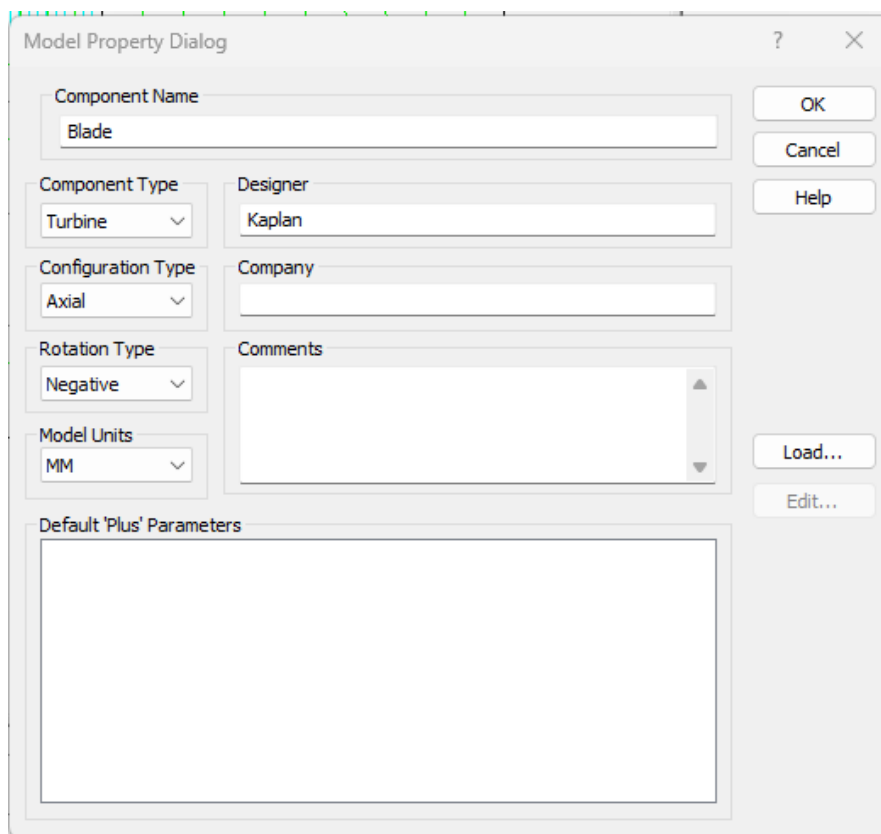


Figura 27

Propiedades del modelo generado en BladeGen



El modelo desarrollado es un componente clave para asegurar un análisis detallado y preciso del comportamiento hidráulico de la Micro Turbina Kaplan, constituyendo la base técnica para los análisis avanzados en simulación numérica.

3.4 Modificación de la geometría del Rodete

En la interfaz de BladeGen, ubicada en la parte superior izquierda, se encuentran las herramientas que permiten modificar la geometría del rodete de la Micro Turbina Kaplan. Estas opciones son esenciales para ajustar la forma de la carcasa (Shroud) y el rodete propiamente dicho (Hub), asegurando que el diseño cumpla con los requerimientos hidráulicos, estructurales y operativos establecidos en el proyecto.

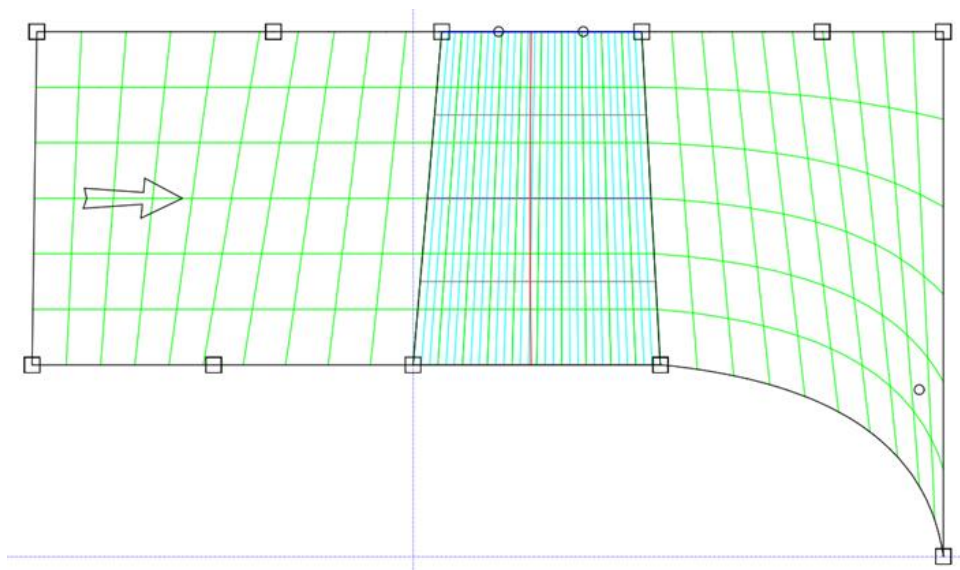
3.4.1 Ajustes Realizados

A) Forma del Shroud (Carcasa)

- Define la superficie exterior que delimita el flujo de agua hacia los álabes.
- Su diseño tiene un impacto directo en la eficiencia hidráulica al reducir las pérdidas asociadas al flujo desviado o turbulento.
- Los ajustes realizados incluyen el uso de curvas Bézier, que permiten una mayor flexibilidad en la Configuración geométrica.

Figura 28

Forma transversal del Shroud, destacando su influencia en la dirección y uniformidad del flujo



B) Forma del Hub (Rodete)

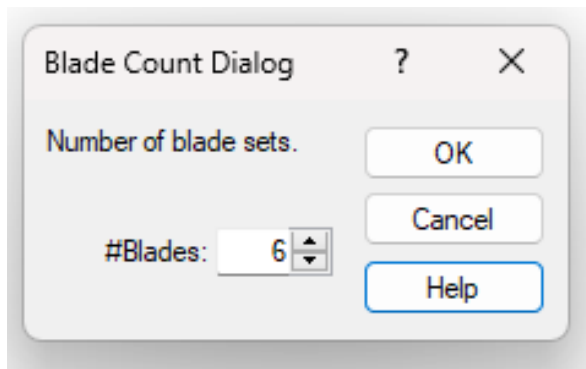
- Determina la superficie interna del rodete, que afecta la distribución del flujo a través de los álabes y contribuye a la eficiencia global del sistema.
- Se ajustaron puntos de control específicos en las coordenadas axiales (Z) y radiales (R), utilizando un esquema Bézier para optimizar el perfil.

C) Número de Álabes

- En esta etapa, se seleccionó el número de álabes que componen el rodete. Para este diseño, se optó por seis álabes, que proporcionan un equilibrio entre eficiencia y adaptabilidad a condiciones variables de flujo.

Figura 29

Configuración del número de álabes en la interfaz de BladeGen



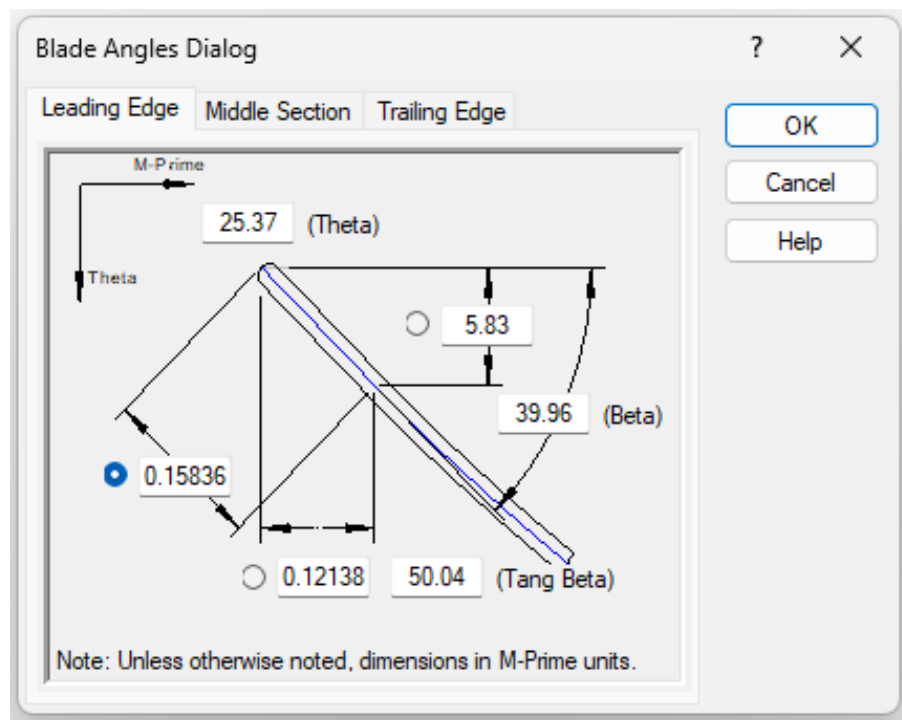
D) Perfiles de los Álabes

El diseño de los álabes incluye perfiles aerodinámicos que maximizan la eficiencia hidráulica al minimizar las pérdidas por fricción y turbulencia. Cada álabe fue dividido en tres secciones principales: perfil líder, perfil medio y perfil final.

- **Perfil líder:** Responsable de captar el flujo inicial y dirigirlo eficientemente hacia el álabe.

Figura 30

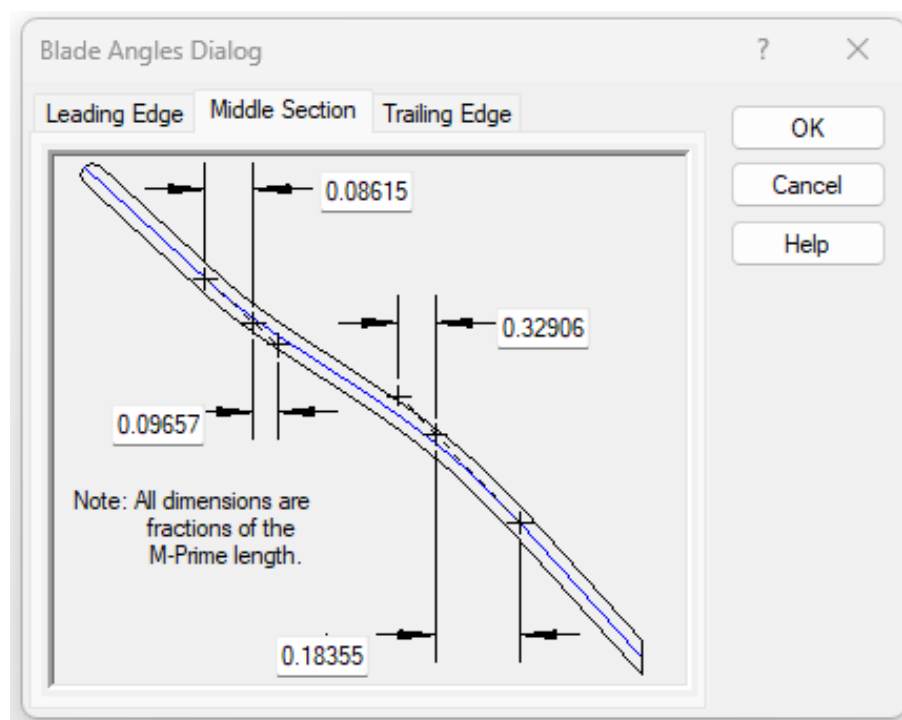
Perfil líder del álabe



- **Perfil medio:** Asegura la transición uniforme del flujo, reduciendo las fluctuaciones y manteniendo la estabilidad.

Figura 31

Perfil medio del álabe



- **Perfil final:** Optimiza la salida del flujo para minimizar las pérdidas energéticas.

Figura 32

Perfil final del álabe

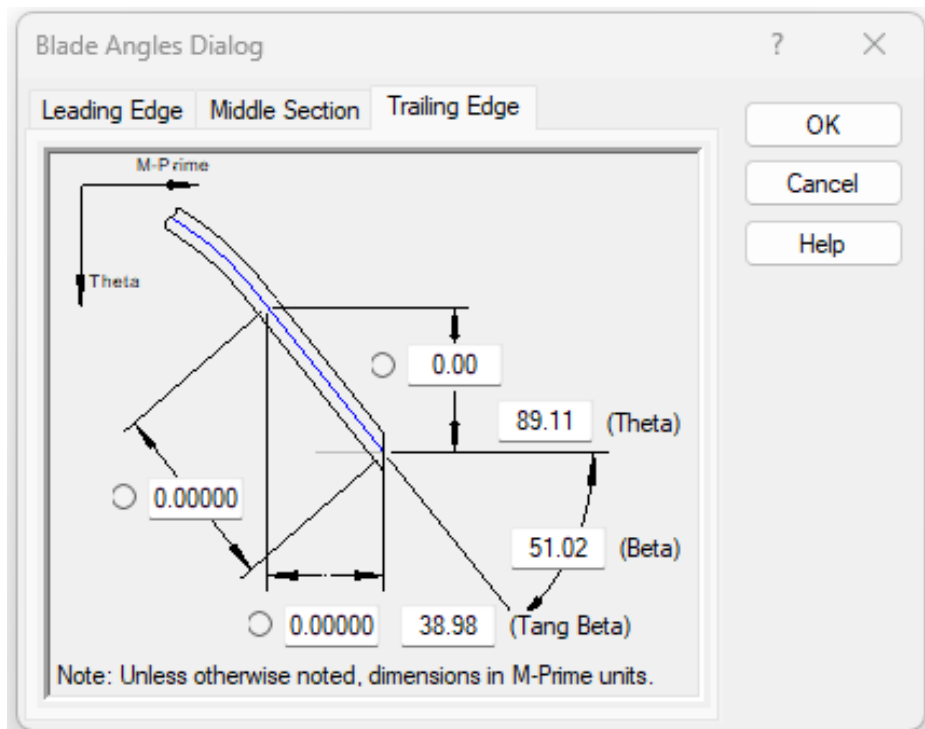


Tabla 2

Puntos de control definidos para el Hub y el Shroud en BladeGen

Hub:Seg00:Bezier		Hub:Seg01:Bezier		Hub:Seg02:Bezier	
Axial (Z)	Radial (R)	Axial (Z)	Radial (R)	Axial (Z)	Radial (R)
-260.0000	130.0000	-135.3650	130.0000	168.0950	130.0000
-135.3650	130.0000	168.0950	130.0000	343.7380	113.0100
				360.0000	0.0000
Shroud:Seg00:Bezier		Shroud:Seg01:Bezier		Shroud:Seg02:Bezier	
Axial (Z)	Radial (R)	Axial (Z)	Radial (R)	Axial (Z)	Radial (R)
-260.0000	350.0000	-94.7807	350.0000	277.7530	350.0000
-94.7807	350.0000	58.2021	350.0000	360.0000	350.0000
		115.7150	350.0000		
		277.7530	350.0000		

E) Curvas de Control y Parámetros

El ajuste geométrico del Hub y el Shroud, ver Tabla 2, se realizó mediante curvas Bézier, con puntos de control definidos para garantizar una distribución uniforme del flujo:

1. Puntos de Control del Hub:

- Controlan la forma interna del rodete, ajustando las dimensiones axiales y radiales para optimizar la interacción con el fluido.

2. Puntos de Control del Shroud:

- Configuran la carcasa externa para dirigir el flujo hacia los álabes con la menor resistencia posible.

F) Impacto de las Modificaciones

Las modificaciones realizadas permiten:

- **Mejorar la eficiencia hidráulica:** Reducción de pérdidas por turbulencia y fricción en el flujo.
- **Optimizar el diseño estructural:** Garantizando que el rodete pueda soportar las cargas hidráulicas sin comprometer su integridad.
- **Incrementar la adaptabilidad:** Asegurando un desempeño estable en condiciones variables de flujo.

El modelo ajustado en BladeGen será utilizado como base para las simulaciones fluidodinámicas en CFX, permitiendo validar las configuraciones geométricas y analizar su impacto en el rendimiento global de la Micro Turbina Kaplan. Este enfoque integral asegura que las modificaciones realizadas cumplan con los objetivos de diseño y operación previstos.

3.5 Enmallado del modelo de Micro Turbina Kaplan

Tras completar la etapa de generación de la geometría en BladeGen, se procede al proceso de enmallado, una fase crucial para garantizar la precisión de los resultados obtenidos en las simulaciones fluidodinámicas. El mallado se realiza utilizando el módulo TurboGrid de ANSYS (ANSYS, 2015c), una herramienta especializada en la generación de mallas de alta calidad para turbomáquinas, adaptada específicamente a las características del modelo de la Micro Turbina Kaplan.

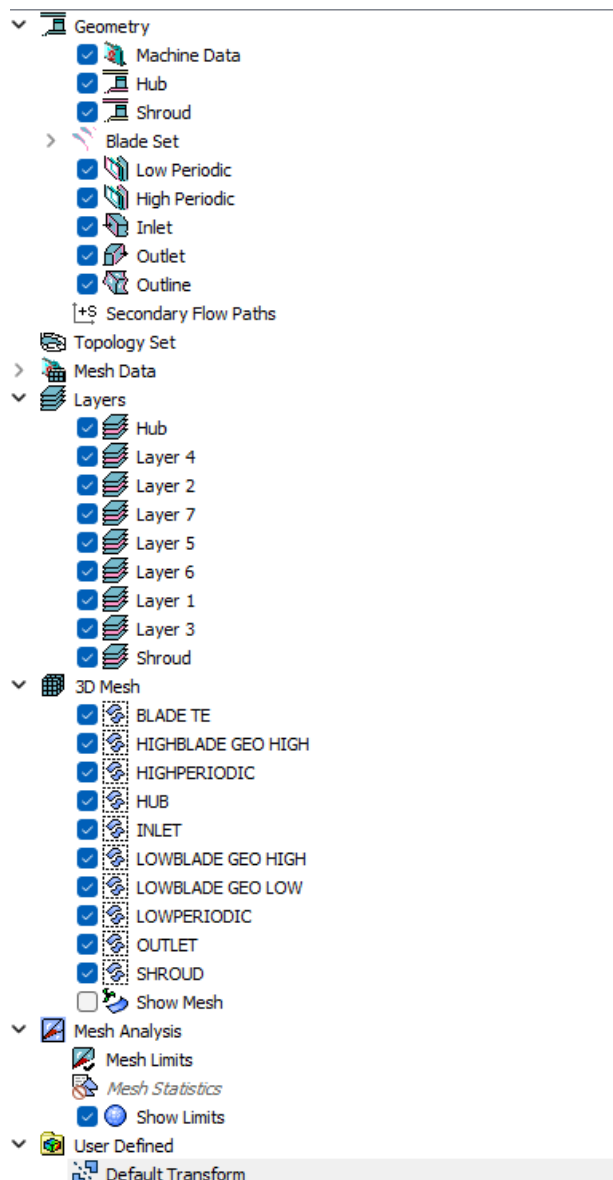
3.5.1 Ventajas de TurboGrid

A) Compatibilidad Directa con BladeGen

- TurboGrid (ANSYS, 2015c) trabaja directamente con la geometría generada en BladeGen, evitando la necesidad de importar datos desde programas externos.
- Esta integración asegura una transferencia de datos sin errores, lo que optimiza el proceso y garantiza la fidelidad entre el modelo geométrico y la malla generada.

Figura 33

Configuración inicial para la simulación en TurboGrid



B) Optimización para Turbinas Simétricas

- La Micro Turbina Kaplan posee una simetría inherente que permite realizar el análisis en una región representativa que incluye un solo álabe.
- Esta estrategia reduce significativamente la carga computacional, ya que los resultados de esta región se extrapolan al resto del modelo sin comprometer la precisión.
- El uso de esta técnica optimizada asegura que el análisis sea eficiente y manejable en términos de recursos computacionales.

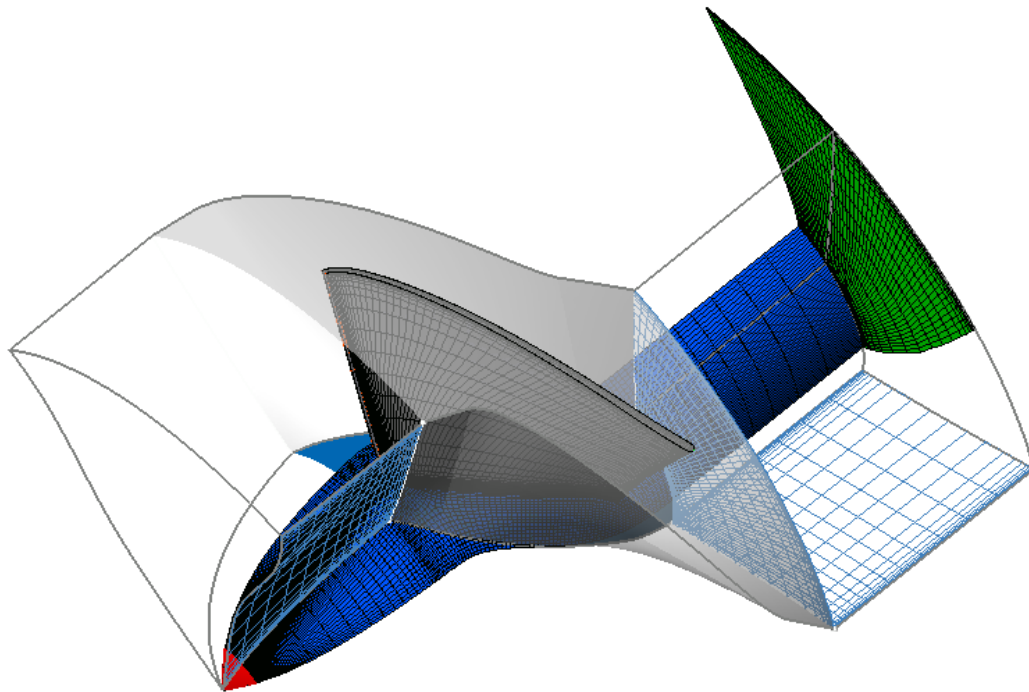
3.5.2 Características de la Malla Generada

A) Malla de Alta Calidad

- TurboGrid genera una malla estructurada específica para turbomáquinas, que permite una representación precisa de las superficies del rodete y los álabes.

Figura 34

Región equivalente seleccionada para optimizar la simulación



- La malla está compuesta por aproximadamente 1.5 millones de celdas, aproximadamente, lo que proporciona una alta resolución en las zonas críticas, como los bordes de ataque y salida de los álabes, donde las interacciones del flujo son más complejas.

B) Detección y Corrección de Errores

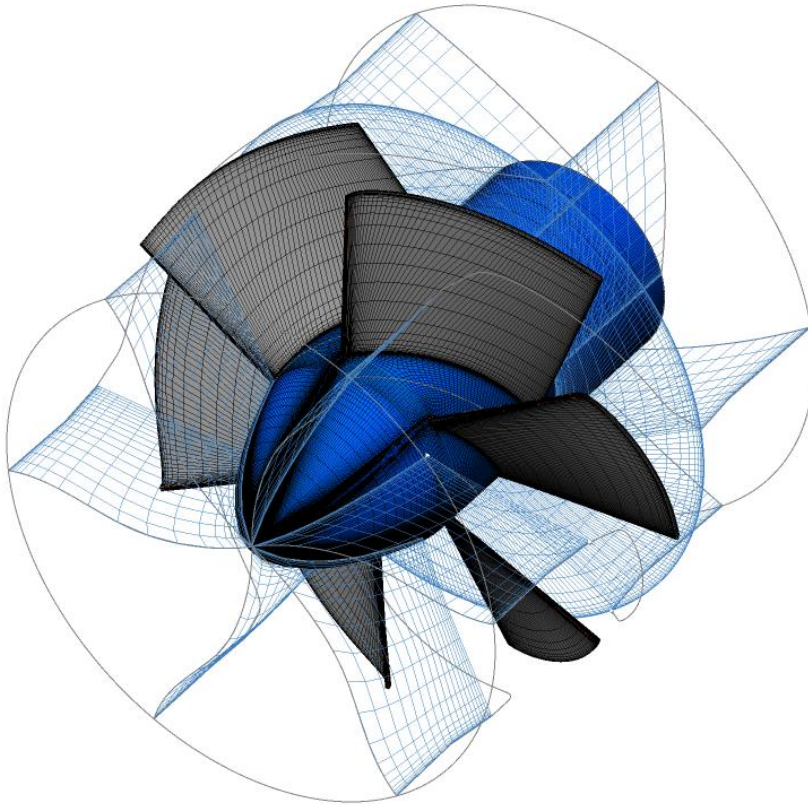
- En algunos casos, TurboGrid puede emitir mensajes de error relacionados con las configuraciones del Hub y el Shroud que exceden los límites recomendados.
- Este problema se resuelve fácilmente siguiendo los pasos:
 - Acceder a la opción Machine Data en la ventana izquierda de la interfaz.
 - Modificar las Base Units para asegurarse de que las unidades estén en metros.
- Estas configuraciones garantizan que los datos geométricos sean interpretados correctamente por el software.

3.5.3 Alternativas de Mallado

Aunque TurboGrid es la herramienta ideal para el enmallado de turbomáquinas, también se dispone del módulo Mesh, que permite generar mallas para una amplia variedad de geometrías. Sin embargo, el uso de Mesh requiere configuraciones adicionales, ya que no está optimizado específicamente para modelos de turbinas, lo que puede aumentar la carga de trabajo y disminuir la eficiencia del proceso.

Figura 35

Vista detallada de la malla generada con Mesh



El uso de TurboGrid en el proceso de enmallado asegura una combinación óptima de eficiencia computacional y precisión en los resultados. Al generar mallas específicas para turbomáquinas, se logra una representación detallada de las superficies del rodete y los álabes, facilitando simulaciones fluidodinámicas confiables en ANSYS CFX. Una vez completado el mallado, se procederá a realizar las simulaciones para validar el diseño y analizar el rendimiento del rodete bajo condiciones de operación reales.

3.6 Generación de la malla tridimensional

La generación de la malla tridimensional es un paso fundamental en el análisis fluidodinámico, ya que permite representar el flujo tridimensional alrededor del rodete de la Micro Turbina Kaplan con gran precisión. Este proceso transforma el modelo bidimensional generado en TurboGrid en una malla volumétrica que sirve como base para las simulaciones CFD en ANSYS CFX.

3.6.1 Procedimiento para Generar la Malla 3D

A) Acceso a la Herramienta de Mallado

- En la interfaz de TurboGrid, se utiliza la pestaña 3D Mesh, ubicada en la ventana izquierda, para iniciar la generación de la malla tridimensional.

B) Transformación Volumétrica

- El modelo bidimensional se convierte en una malla tridimensional, incorporando todos los detalles geométricos definidos en etapas anteriores, como el perfil de los álabes y la carcasa.

3.6.2 Gestión de Errores en Mesh Data

Durante este proceso, pueden surgir errores relacionados con el Mesh Data, generalmente atribuibles a limitaciones en el tamaño o resolución del mallado. Estos errores deben resolverse antes de proceder con las simulaciones.

A) Pasos para Resolver el Error

1. Acceso a Mesh Data

- Navegar al menú Mesh Data en la ventana izquierda de TurboGrid.

2. Ajuste del Size Factor

- Incrementar el parámetro Size Factor, que por defecto está conFigurado en 1.0. En este caso:
 - Mejora la resolución: Incrementa la cantidad de volúmenes generados, haciendo que el mallado sea más detallado y representativo.
 - Elimina el error: Permite la creación exitosa de la malla tridimensional.

B) Importancia del Size Factor

- Un Size Factor más alto incrementa la densidad de elementos, permitiendo un análisis más preciso, especialmente en zonas críticas con gradientes pronunciados de presión o velocidad.

- Sin embargo, también aumenta el costo computacional, requiriendo un balance entre precisión y eficiencia. En este proyecto, el ajuste a 1.0 representó un equilibrio adecuado.

Figura 36

Configuración del Size Factor en Mesh Data

Details of Mesh Data

Mesh Size Passage Hub Tip Shroud Tip Inlet Outlet

☐ Lock mesh size

Method: Global Size Factor

Size Factor: 1.0

Boundary Layer Refinement Control

Method: Proportional to Mesh Size

Parameters

Factor Base: 3.0

Factor Ratio: 0.0

☒ Constant First Element Offset

Cutoff Edge Split Factor: 1.0

☒ Target Maximum Expansion Rate

Rate: 1.3

Near Wall Element Size Specification

Method: Absolute

3.6.3 Validación de la Malla

Una vez generada la malla tridimensional, se debe realizar una validación para garantizar su calidad:

A) Revisión Visual:

- Verificar que no existan distorsiones en las celdas y que las transiciones entre capas sean suaves.

B) Distribución de Elementos:

- Confirmar que las regiones críticas, como los bordes de ataque y salida de los álabes, estén representadas con una densidad adecuada de elementos.

Figura 37

Distribución del enmallado en 3D Mesh

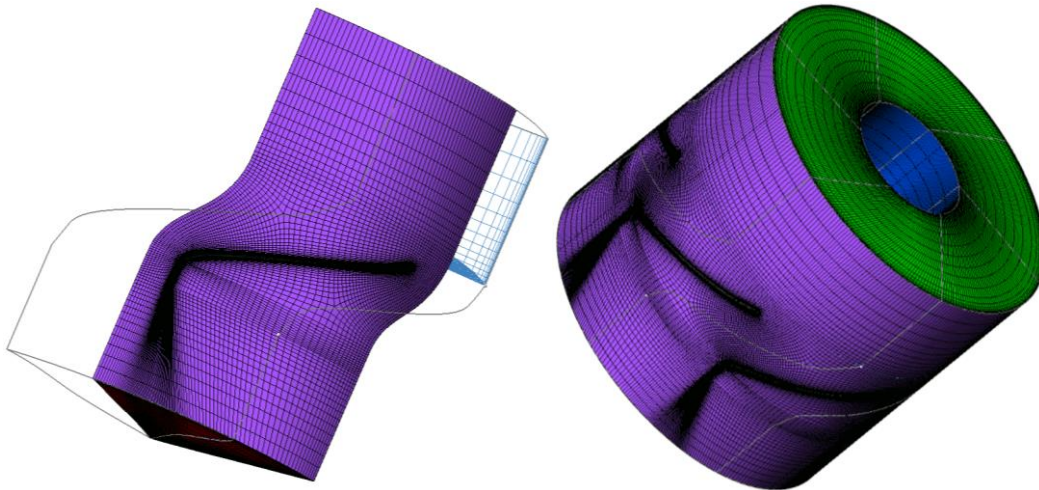


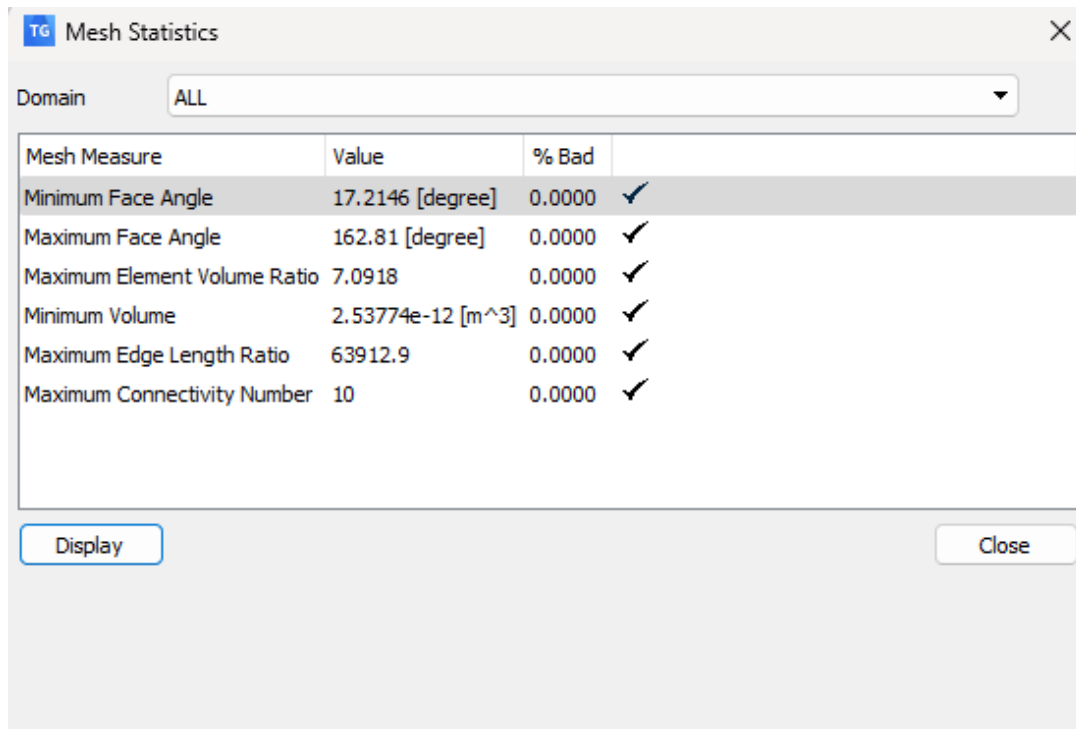
Figura 38

Detalles del generador Mesh

Details of MESH GENERATOR	
3D Mesh	
Node Counts	
All domains:	235899
Passage:	166671
Inlet:	19656
Outlet:	49572
Element Counts	
All domains:	215930
Passage:	154180
Inlet:	17238
Outlet:	44512

Figura 39

Estadísticas del Mesh



Mesh Measure	Value	% Bad	
Minimum Face Angle	17.2146 [degree]	0.0000	✓
Maximum Face Angle	162.81 [degree]	0.0000	✓
Maximum Element Volume Ratio	7.0918	0.0000	✓
Minimum Volume	2.53774e-12 [m^3]	0.0000	✓
Maximum Edge Length Ratio	63912.9	0.0000	✓
Maximum Connectivity Number	10	0.0000	✓

3.6.4 Distribución y Propiedades del Mallado

El mallado tridimensional se divide en tres regiones principales, debidamente monitoreados, cada una con una cantidad específica de nodos, elementos y un volumen asociado:

A) Malla del Inlet (Entrada)

- Cantidad de nodos: 19,656
- Cantidad de elementos: 17,238
- Volumen: 0.0129503 m³

B) Malla del Passage Main (Pasaje Principal)

- Cantidad de nodos: 166,671
- Cantidad de elementos: 154,180
- Volumen: 0.0127776 m³

C) Malla del Outlet (Salida)

- Cantidad de nodos: 49,572

- Cantidad de elementos: 44,512
- Volumen: 0.0100573 m³

La generación de la malla tridimensional en TurboGrid es un paso crítico que asegura la representación precisa del flujo alrededor del rodete de la Micro Turbina Kaplan. Los ajustes realizados, como el incremento del Size Factor, optimizaron la calidad del mallado, logrando un balance entre precisión y eficiencia computacional. Tras validar la malla, el modelo está listo para proceder con las simulaciones CFD en ANSYS CFX, lo que permitirá analizar en detalle el desempeño del sistema bajo condiciones operativas reales.

3.7 Configuración y simulación en ANSYS CFX

Después de generar la geometría y el mallado del rodete, la siguiente etapa consiste en configurar y ejecutar la simulación utilizando el módulo CFX de ANSYS (ANSYS, 2015b). Este software es ideal para analizar problemas de dinámica de fluidos en turbomáquinas, permitiendo trabajar directamente con geometrías rotativas y flujos complejos. En esta sección se describen los pasos clave para configurar el solver, definir las condiciones de frontera y realizar el análisis de los resultados.

3.7.1 Configuración General del Solver en CFX

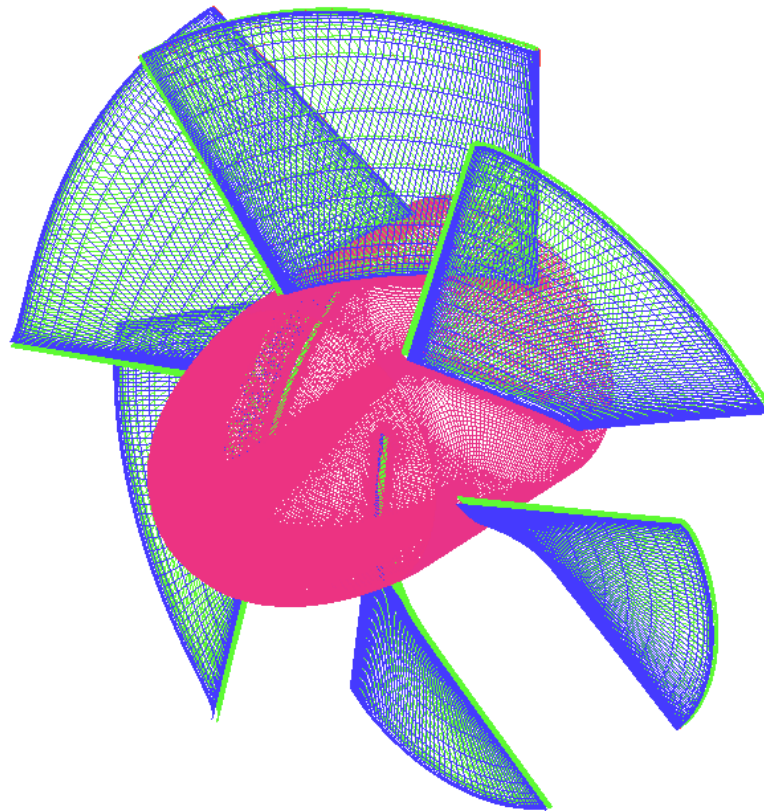
A) Dominio de Simulación

- Se define el dominio de la simulación utilizando agua líquida como fluido principal, considerando un modelo de flujo incompresible.
- Se activa la gravedad en dirección vertical para incluir los efectos gravitacionales en el análisis.
- Las velocidades absolutas se configuran para representar el flujo sin movimiento inicial impuesto.
- El análisis se define como estacionario (steady state), ya que las condiciones de flujo no varían con el tiempo.

Para la Micro Turbina Kaplan, la simulación en Steady State permite evaluar parámetros clave como el coeficiente de potencia en condiciones operativas constantes, optimizando los cálculos para diseñar sistemas eficientes.

Figura 40

Dominio de la Micro Turbina Kaplan



3.7.2 Configuración del Modelo de Turbulencia

El modelo de turbulencia seleccionado es crucial para representar de manera precisa el comportamiento del flujo en la Micro Turbina Kaplan.

A) Modelo Seleccionado

- Se utiliza el modelo k-epsilon ($K-\epsilon$) estándar, ampliamente aceptado por su robustez y aplicabilidad en flujos industriales, incluyendo turbomáquinas.
- Este modelo permite una representación adecuada de la capa límite y captura eficientemente las características del flujo en el rodete y la carcasa.

- El modelo K-ε ha sido diseñado para capas de corte planas y flujos recirculantes, ver Anexo C. El modelo comprende dos ecuaciones, la energía cinética turbulenta y la disipación.

Para la energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2u_t E_{ij} E_{ij} - \rho * \varepsilon \quad (16)$$

En la ecuación 17 se formula para la disipación ε:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2u_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} * \rho * \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (17)$$

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 los parámetros σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$. Los rangos de flujos turbulentos se han analizado mediante numerosas iteraciones de ajuste de datos, lo que ha permitido determinar los valores adecuados de acuerdo con lo planteado por (Versteeg & Malalasekera, 2007), considerándose los siguientes parámetros:

$$C_u = 0.09 \quad (18)$$

$$\sigma_k = 1.00 \quad (19)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (20)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad (21)$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (22)$$

B) Configuración del Dominio Rotativo

- El rodete se configura como un dominio rotativo, definiendo una velocidad angular de 60 revoluciones por minuto (RPM).
- El resto del dominio se establece como **estacionario**, representando el flujo circundante.

Tabla 3*Resumen de la Configuración de la simulación - 1*

Rodete	
Modelo de turbulencia	k-epsilon
Movimiento del dominio	Estacionario
Presión de referencia	1 atm
Turbina	
Material del fluido	Agua líquida (incompresible)
Morfología del material	Fluido continuo
Movimiento del dominio	Rotacional - 60 rev min ⁻¹
Parámetros de simulación	
Tipo de maquina	Turbina
Eje de rotación	Eje Z
Tipo de Análisis	Steady State

3.7.3 Condiciones de Frontera

A) Entrada (Inlet)

- Se define un flujo másico correspondiente al caudal de diseño de 2.4 m³/s.
- La dirección del flujo se especifica como normal a la entrada para asegurar la uniformidad.

B) Salida (Outlet)

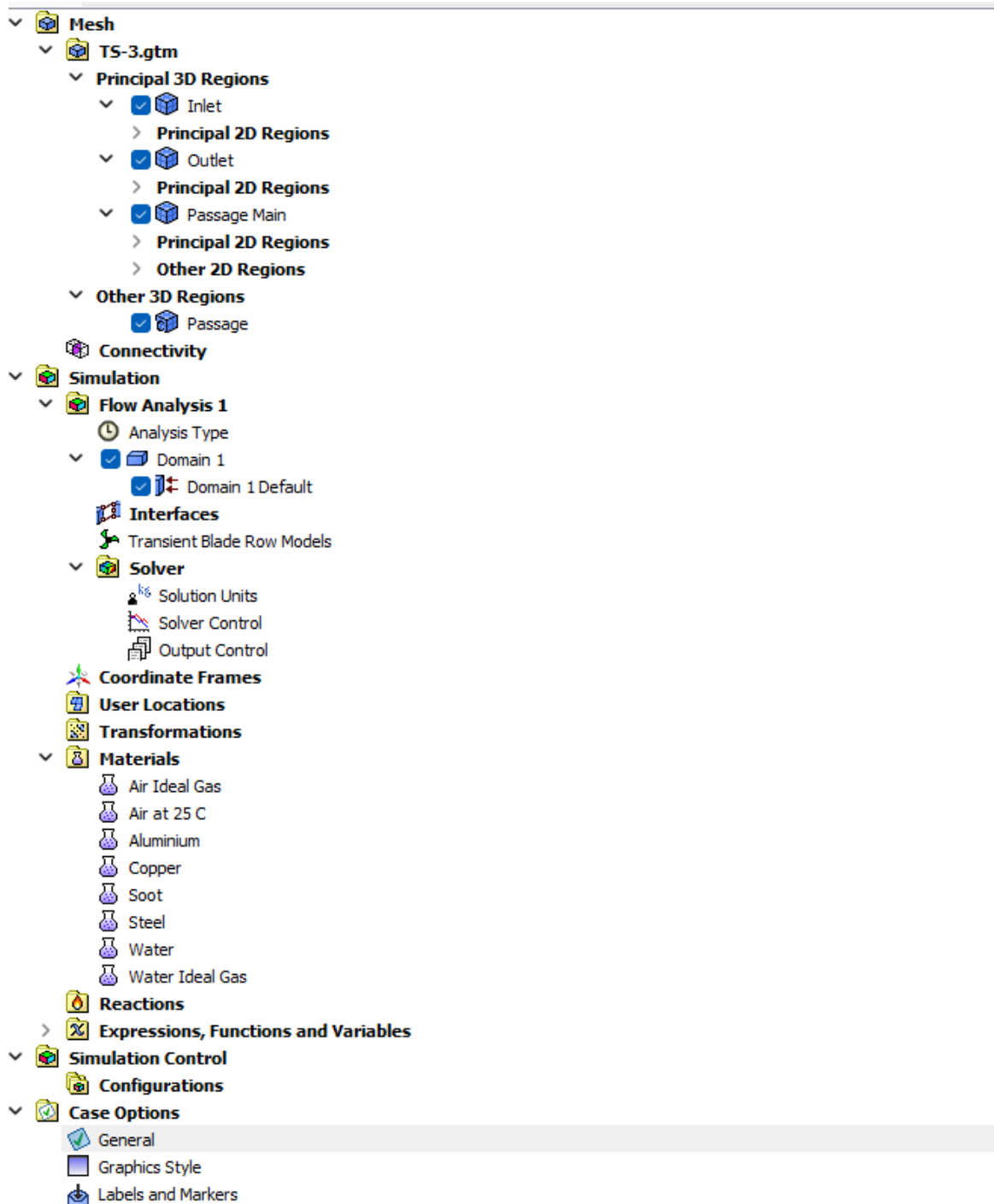
- Se establece una condición de presión fija equivalente a la presión atmosférica, representando la salida del flujo en el tubo de aspiración.

C) Paredes (Walls)

- Las superficies del rodete y la carcasa se configuran con una condición de no deslizamiento (no-slip) para modelar con precisión la interacción fluido-estructura.

Figura 41

Configuración de las condiciones de frontera



3.7.4 Simulación y Análisis de Resultados

Una vez configurados todos los parámetros, se ejecuta la simulación en CFX-Solver para evaluar el rendimiento de la Micro Turbina Kaplan bajo condiciones operativas reales.

Resultados incluirán

- **Distribución de Presión**

- Se analiza cómo se distribuye la presión a lo largo del rodete y el tubo de aspiración, identificando posibles áreas de alta carga hidráulica.

- **Gradientes de Velocidad**

- Se evalúan las variaciones de velocidad en la entrada y salida de los álabes, destacando las zonas de mayor eficiencia.

- **Rendimiento Global**

- Incluye la potencia generada y la eficiencia de conversión de energía hidráulica en mecánica.

Los resultados obtenidos se procesan y visualizan en CFX-Post, donde se interpretan los datos y se validan los diseños. Este análisis es fundamental para identificar oportunidades de optimización y garantizar un rendimiento óptimo de la Micro Turbina Kaplan.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del diseño, modelado y simulación de una Micro Turbina Kaplan mediante herramientas avanzadas de ANSYS, como **BladeGen**, **TurboGrid** y **CFX**. Se evalúan los parámetros clave del desempeño de la turbina bajo diversas condiciones operativas, permitiendo validar su diseño y proponer posibles optimizaciones.

4.1 Condiciones de Frontera y Cálculo del Coeficiente de Potencia

El coeficiente de potencia C_p es una métrica fundamental para determinar la eficiencia de conversión de energía cinética del flujo de agua en energía eléctrica por la turbina (Kosky et al., 2013). La fórmula utilizada es:

$$C_p = 2 * \frac{P_{obtenida}}{\rho v^3 A} \quad (23)$$

Donde:

- C_p : Coeficiente de potencia
- $P_{obtenida}$: Potencia eléctrica obtenida
- ρ : Densidad del fluido (agua)
- v : Velocidad del flujo
- A : Área transversal proyectada

4.1.1 Interpretación de Resultados

La simulación realizada en ANSYS CFX permitió evaluar la distribución de presiones, velocidades y otros parámetros relevantes, como se detalla a continuación:

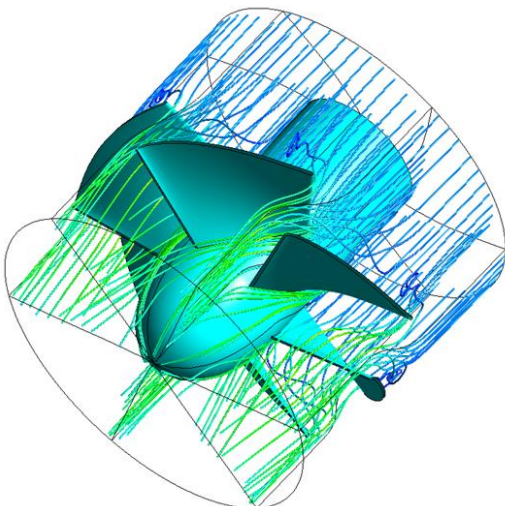
1. La potencia generada aumenta significativamente con la altura de caída de agua, como se observa en los valores obtenidos. A alturas bajas, la potencia es limitada debido a la menor energía disponible en el flujo. A medida que la altura aumenta, la energía cinética del agua también lo hace, mejorando la conversión energética.
2. El C_p incrementa con la altura de caída, alcanzando un valor máximo de 0.616083 a 2.00 metros. Este aumento refleja una mayor eficiencia de la turbina en condiciones de flujo optimizadas. Sin embargo, valores de C_p por debajo de 0.5 en alturas menores indican pérdidas energéticas y margen para mejoras en el diseño.
3. Durante todas las simulaciones, el área transversal proyectada (A) se mantuvo constante en 0.384 m^2 , asegurando un análisis homogéneo de las condiciones operativas.

4.1.2 Consolidado de Resultados

En la simulación realizada en ANSYS CFX, se generó un modelo tridimensional detallado del rodete y el flujo circundante. La Figura 42 muestra la Configuración para la simulación, destacando las líneas de corriente y la interacción del flujo con los álabes de la Micro Turbina Kaplan, lo que permitió evaluar la distribución de velocidades y presiones.

Figura 42

Interacción del flujo de corriente con los álabes de la Micro Turbina Kaplan



La Tabla 4 resume los principales datos obtenidos:

Tabla 4

Resumen de la Configuración de la simulación - 2

Altura de caída (m)	v (m/s)	P (W)	A (m ²)	C_p
0.12	1.53	7.109	0.384	0.010249
0.35	2.62	787.189	0.384	0.227839
0.65	3.57	3036.391	0.384	0.347247
1.12	4.69	8640.076	0.384	0.436859
1.46	5.35	15398.275	0.384	0.523110
1.60	5.60	19367.602	0.384	0.573517
2.00	6.26	29075.929	0.384	0.616083

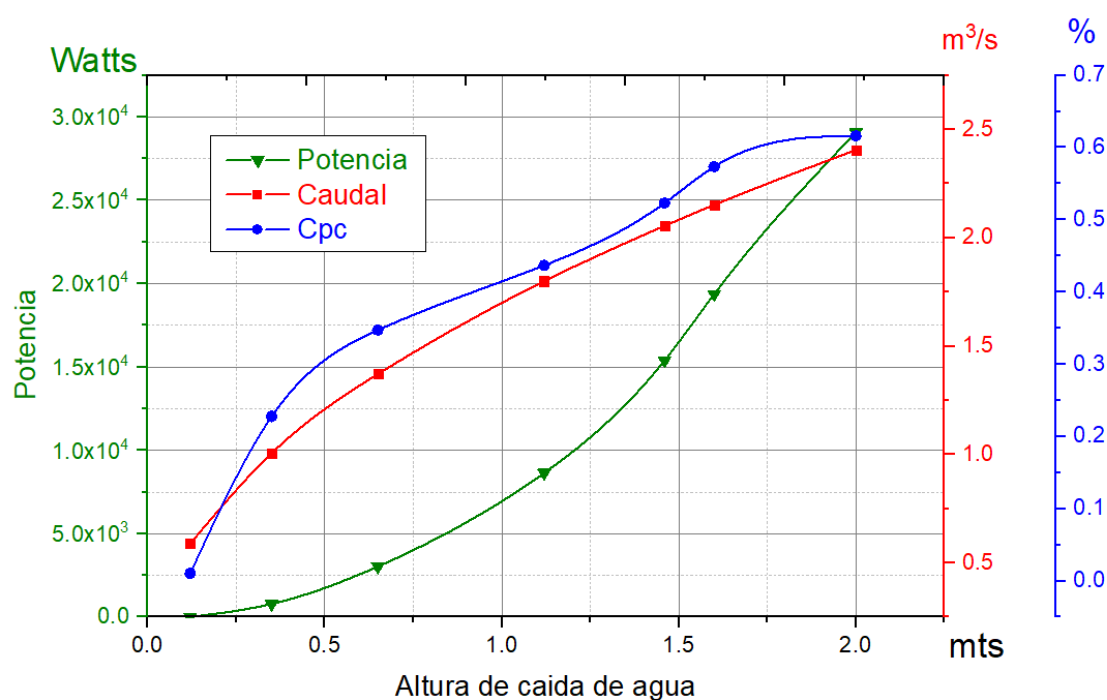
• Análisis Gráfico

La Figura 43 muestra la relación entre la altura de caída de agua, el caudal, la potencia generada y el coeficiente de potencia.

Figura 43

Condiciones de operación de minicentral eléctrica con Micro Turbina Kaplan

CONDICIONES DE OPERACIÓN-MINICENTRAL ELECTRICA



- La potencia generada aumenta exponencialmente con la altura de caída, destacando el impacto de este parámetro en el rendimiento.
- El caudal presenta una tendencia lineal ascendente, reflejando el aumento de la velocidad del fluido con la altura de caída.

- El C_p sigue una curva logarítmica, alcanzando su valor óptimo en las mayores alturas de caída.

Los resultados demuestran que la Micro Turbina Kaplan diseñada es eficiente para ríos de bajo caudal, especialmente cuando la altura de caída supera los 1.0 metros. Sin embargo, en alturas menores, la eficiencia es limitada, sugiriendo la necesidad de ajustes en el diseño del rodete y los álabes para optimizar el rendimiento en dichas condiciones. La validación mediante simulación CFD permite asegurar la precisión de los resultados y orientar futuras mejoras en el diseño.

Si bien el análisis del campo de presiones no es esencial para los objetivos planteados en esta investigación, se reconoce su importancia en estudios futuros, ver Recomendaciones. Evaluar el campo de presiones podría proporcionar información detallada sobre las cargas hidráulicas distribuidas en los álabes y otras superficies de la turbina, lo que sería útil para:

- **Diseño estructural:** Garantizar que los componentes de la turbina puedan soportar las cargas hidráulicas sin comprometer su integridad mecánica.
- **Optimización hidráulica:** Identificar áreas de pérdidas de energía asociadas con gradientes de presión elevados, lo que podría ayudar a mejorar la eficiencia general del sistema.
- **Prevención de cavitación:** Analizar la distribución de presiones permite identificar zonas de presión crítica donde podrían generarse fenómenos de cavitación, que afectan el rendimiento y la durabilidad de la turbina.

4.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en ANSYS CFX proporcionan una visión detallada del desempeño de la Micro Turbina Kaplan bajo diversas condiciones operativas. La siguiente discusión analiza los principales hallazgos, relacionándolos con los objetivos del estudio y la literatura existente.

A) Relación entre la altura de caída y el coeficiente de potencia

El análisis muestra que el coeficiente de potencia (C_p) aumenta consistentemente con la altura de caída del agua, alcanzando un valor máximo de 0.616 cuando la altura es de 2.0 metros. Este comportamiento es consistente con lo reportado en estudios como el de Abeykoon (2022), quien destacó que las Micro Turbinas Kaplan presentan altos valores de eficiencia en condiciones de mayor energía hidráulica disponible. Este fenómeno se debe a la capacidad inherente de las Micro Turbinas Kaplan para adaptarse a flujos de mayor energía, maximizando la conversión de energía cinética en potencia mecánica. Los resultados confirman la capacidad de la turbina para operar eficientemente bajo estas condiciones.

B) Velocidad del flujo y su impacto en la potencia generada

La velocidad del flujo, que varía desde 1.53 m/s hasta 6.26 m/s, influye directamente en la potencia generada, alcanzando un valor máximo de 29,075.93 W a la altura de 2.0 metros. Este incremento es consistente con la teoría de dinámica de fluidos, donde el flujo más rápido incrementa la cantidad de energía disponible para ser convertida en energía mecánica. La relación entre velocidad y potencia obtenida valida los cálculos previos y demuestra la efectividad del diseño optimizado.

C) Evaluación de la eficiencia hidráulica

El rendimiento global de la turbina se evidencia a través de la correlación entre la eficiencia obtenida y las simulaciones realizadas. Los gradientes de presión y velocidad observados en las simulaciones muestran una distribución uniforme a lo largo del rodete, lo que minimiza las pérdidas hidráulicas. Este comportamiento refuerza el diseño del rodete y los álabes ajustados en BladeGen, así como la calidad del mallado generado en TurboGrid.

La optimización en el diseño de una micro turbina Kaplan se refleja directamente en la mejora de su eficiencia energética, evaluada mediante el coeficiente de potencia (C_p). Este parámetro cuantifica la proporción de energía cinética del flujo de agua que la turbina es capaz de convertir en energía mecánica útil. Una mejora en el coeficiente de potencia

indica que el diseño geométrico y las condiciones operativas de la turbina están mejor adaptadas para maximizar la conversión energética.

D) Comparación con diseños teóricos y literaturas previas

La validación del diseño y los valores obtenidos en las simulaciones se alinean con los coeficientes de potencia reportados para Micro Turbinas Kaplan en ríos de bajo caudal. Los resultados del estudio no solo confirman la precisión del modelo generado, sino que también destacan la importancia de un adecuado diseño geométrico y Configuración de simulación en ANSYS.

E) Limitaciones y oportunidades de mejora

Aunque los resultados son prometedores, es importante reconocer ciertas limitaciones. Por ejemplo, las simulaciones fueron realizadas bajo condiciones estacionarias, lo que podría limitar la representación de fenómenos transitorios como cavitación o fluctuaciones en el flujo. Estudios futuros podrían abordar estas dinámicas utilizando simulaciones transitorias y modelos de cavitación.

F) Contribución al diseño de turbinas en sistemas hidroeléctricos

Finalmente, los resultados de este análisis destacan la relevancia del diseño optimizado de Micro Turbinas Kaplan para aplicaciones en ríos de bajo caudal. La capacidad de alcanzar coeficientes de potencia elevados bajo condiciones operativas reales respalda el uso de estas turbinas en proyectos hidroeléctricos pequeños, promoviendo el aprovechamiento sostenible de recursos hídricos.

4.3 Contrastación de hipótesis

La contrastación de hipótesis en este estudio se realiza mediante el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas de la Micro Turbina Kaplan, evaluando las variables dependientes e independientes definidas en la investigación. Este proceso tiene como objetivo validar las hipótesis propuestas en función de los datos observados, estableciendo su consistencia con los resultados del análisis.

De la hipótesis general se contrasta que los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas confirman que el coeficiente de potencia de la Micro Turbina Kaplan se optimiza con la geometría del rodete y los álabes bajo el análisis de las condiciones hidráulicas del flujo. Por ejemplo:

- El coeficiente de potencia (C_p) alcanzó su valor máximo de 0.616 bajo una altura de caída de agua de 2.0 m, demostrando una relación directa entre las características geométricas y las condiciones hidráulicas.
- La simulación numérica permitió identificar configuraciones óptimas, validando la capacidad de la turbina para operar de manera eficiente en condiciones de bajo caudal. Estos resultados son consistentes con la hipótesis general.

Por lo tanto, la hipótesis general se acepta, ya que la simulación numérica valida la influencia positiva de la optimización geométrica y el análisis hidráulico en el coeficiente de potencia.

Sobre la contrastación de las hipótesis específicas, se tienen:

Hipótesis 1: El diseño y modelado geométrico del rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan, basado en parámetros hidráulicos y operativos de ríos de bajo caudal, influye significativamente en la optimización del coeficiente de potencia.

Contrastación: El diseño realizado con ANSYS BladeGen permitió obtener un modelo geométrico detallado, ajustado a las condiciones hidráulicas específicas de ríos de bajo caudal. Los parámetros como el radio del rodete, el largo de los álabes y el perfil hidráulico impactaron directamente en la eficiencia del flujo. Esto se refleja en la distribución uniforme de presión y velocidad obtenida en las simulaciones, indicando que un diseño geométrico adecuado es esencial para optimizar el rendimiento de la turbina. Por lo tanto, esta hipótesis específica se acepta, ya que el diseño geométrico influye significativamente en el coeficiente de potencia.

Hipótesis 2: La caracterización hidráulica mediante simulación numérica en ANSYS CFX permite identificar condiciones óptimas de velocidad y presión en ríos de bajo caudal, impactando en el rendimiento de la turbina.

Contrastación: La simulación numérica mostró que las características hidráulicas del flujo tienen un impacto directo en el rendimiento de la turbina:

- A mayores alturas de caída y velocidades de flujo, el coeficiente de potencia y la potencia generada aumentan, alcanzando valores óptimos a 2.0 m de altura y 6.26 m/s de velocidad del flujo.
- La distribución de presión en los álabes demostró una transferencia de energía eficiente entre el flujo y el rodete, validando la influencia de las condiciones hidráulicas en el rendimiento.

Por lo tanto, esta hipótesis específica se acepta, ya que los parámetros hidráulicos del flujo condicionan el rendimiento de la turbina.

Hipótesis 3: La evaluación del coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan bajo distintas alturas de caída de agua, realizada con herramientas de simulación numérica, valida su eficiencia y capacidad de aprovechamiento energético en ríos de bajo caudal.

Contrastación: Los resultados indican que el coeficiente de potencia aumenta consistentemente con la altura de caída del agua:

- El análisis en diferentes escenarios de altura muestra un incremento desde 0.010 a 0.616, a medida que la altura de caída varía de 0.12 m a 2.0 m.
- Este comportamiento destaca la capacidad de la simulación numérica para identificar configuraciones óptimas de operación, confirmando que la evaluación de distintas alturas es clave para maximizar el rendimiento.

Por lo tanto, esta hipótesis específica se acepta, ya que la simulación numérica valida la optimización del coeficiente de potencia bajo diferentes alturas de caída

4.4 Aporte

El desarrollo de esta investigación proporciona un aporte significativo al diseño, modelado y análisis de Micro Turbinas Kaplan destinadas a operar en ríos de bajo caudal, mediante la implementación de simulaciones numéricas avanzadas. Este enfoque no solo

permite optimizar la geometría de los álabes y el rodete, sino también evaluar su desempeño bajo diversas condiciones hidráulicas, como variaciones en la altura de caída y la velocidad del flujo.

Los principales aportes son:

- Se desarrolló un modelo detallado del rodete y los álabes de la Micro Turbina Kaplan utilizando ANSYS BladeGen, ajustado a las condiciones específicas de ríos de bajo caudal, lo que garantiza un mejor aprovechamiento de la energía hidráulica disponible.
- Se analizó el coeficiente de potencia bajo diferentes escenarios operativos, alcanzando un valor máximo de 0.616 en las simulaciones, demostrando la viabilidad y eficiencia de la turbina en escenarios de bajo caudal.
- El uso de herramientas como ANSYS CFX para simulación numérica establece un marco metodológico replicable en estudios futuros de turbinas hidráulicas, promoviendo su implementación en sistemas hidroeléctricos de baja escala.
- Este estudio refuerza la viabilidad de las Micro Turbinas Kaplan como una solución energética sostenible para comunidades rurales y sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, fomentando el aprovechamiento responsable de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

La presente investigación demuestra que el análisis y diseño de una Micro Turbina Kaplan para ríos de bajo caudal, mediante simulaciones numéricas avanzadas en ANSYS BladeGen y CFX, permite optimizar su coeficiente de potencia y eficiencia hidráulica. El uso de técnicas de modelado geométrico y simulación de flujo ha permitido identificar configuraciones óptimas de diseño y operación, maximizando el aprovechamiento energético en escenarios de caudal limitado. Este enfoque valida la viabilidad de las Micro Turbinas Kaplan como una solución sostenible para generar energía renovable en sistemas hidroeléctricos de baja escala.

Las conclusiones específicas son:

1. El diseño y modelado geométrico del rodete y los álabes de la Micro Turbina Kaplan, desarrollado en ANSYS BladeGen, permite ajustar sus características estructurales a las condiciones operativas de ríos de bajo caudal. Parámetros como el radio del rodete, la altura de los álabes y el perfil hidráulico impactaron significativamente en el comportamiento del flujo, validando la importancia de un diseño geométrico preciso para mejorar el rendimiento.
2. La simulación numérica en ANSYS CFX permitió caracterizar las condiciones hidráulicas de operación de la turbina, identificando que parámetros como la velocidad del flujo y la distribución de presiones en los álabes influyen directamente en el rendimiento de la turbina. El análisis de estas condiciones confirmó que la turbina alcanza mayores eficiencias bajo alturas de caída superiores a 1.5 metros y velocidades de flujo de hasta 6.26 m/s.

3. La evaluación del coeficiente de potencia bajo distintas alturas de caída demostró un incremento consistente con el aumento de la energía hidráulica disponible, alcanzando un valor máximo de 0.616 a una altura de 2.0 metros. Este resultado confirma la capacidad de la turbina para operar de manera eficiente en condiciones de bajo caudal, validando la hipótesis de que el diseño y las condiciones hidráulicas impactan directamente en la optimización del coeficiente de potencia.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones se tienen:

- Se recomienda explorar nuevas configuraciones geométricas del rodete y los álabes mediante herramientas de optimización paramétrica, considerando variaciones en el ángulo de ataque y el perfil de los álabes para maximizar aún más el coeficiente de potencia.
- Realizar simulaciones adicionales que incluyan condiciones de operación con caudales extremos (tanto bajos como altos) para evaluar la robustez y adaptabilidad del diseño propuesto en un rango más amplio de escenarios.
- Complementar los resultados numéricos con ensayos experimentales en un modelo físico a escala de la Micro Turbina Kaplan para comparar y validar los datos obtenidos, garantizando la aplicabilidad práctica de los hallazgos.
- Se recomienda incluir el análisis del campo de presiones como parte de un enfoque integral para optimizar tanto el diseño hidráulico como estructural de la micro turbina Kaplan, especialmente si se pretende explorar aplicaciones en escenarios más exigentes o con mayores demandas operativas.
- Considerar la aplicación de este diseño optimizado en proyectos hidroeléctricos piloto para ríos de bajo caudal en comunidades rurales, promoviendo su viabilidad técnica y económica como una solución energética renovable.

REFERENCIAS

- Abeykoon, C. (2022). Modelling and optimisation of a Kaplan turbine — A comprehensive theoretical and CFD study. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100017>
- Aguilar Loayza, V. A., y Guayasamín Betún, P. X. (2022) *Estudio numérico de una turbina hidráulica tipo Kaplan usando OpenFOAM*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22834>
- Alarcón-Africano, J. G., y Díaz-Suescún, L. L. (2018) *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare* [Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/15989>
- ANSYS, Inc. (7 de setiembre del 2015^a). BladeGen Tutorial Guide. In *ANSYS 18.0*. ANSYS, Inc.
- ANSYS, Inc. (7 de setiembre del 2015^b). CFX Tutorial Guide. In *ANSYS 18.0*. ANSYS, Inc.
- ANSYS, Inc. (7 de setiembre del 2015^c). TurboGridTutorial Guide. In *ANSYS 18.0*. ANSYS, Inc.
- Aponte Simbrón, N. A. (2019) *Diseño de una turbina hidráulica para aprovechamiento energético en tuberías de transporte de agua de Cia Minera Antamina S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú.]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7024>
- Ardila Marín, J. G., y Hincapié Zuluzaga, D. A. (2012) Intercambiadores de calor de tubo en espiral. *Revista UIS Ingenierías*, 11(2), 203–213. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756872006>

- Arrieta, E. L. C., y Clemente, A. R. (2019). Computational Fluid Dynamic Simulation of Vertical Axis Hydrokinetic Turbines. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.89184>
- Ávalos, H., Alcántar, A., Mora, I., López, R., y Patrón, E. (2013) *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión* (1 Ed). SEMARNAT. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf
- Campoblanco Díaz, H., y Gomero Torres, J. (2000). Importancia de los ríos en el entorno ambiental. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 3(5), 57–63. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v3i5.2539>
- CEPAL. (7 de setiembre del 2022a). *Los servicios básicos de agua potable y electricidad como sectores clave para la recuperación transformadora en América Latina y el Caribe*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/enfoques/servicios-basicos-agua-potable-electricidad-como-sectores-clave-la-recuperacion>
- CEPAL. (8 de diciembre del 2022b). *Una recuperación transformadora en América Latina y el Caribe con servicios básicos de agua potable y electricidad como sectores clave*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/notas/recuperacion-transformadora-america-latina-caribe-servicios-basicos-agua-potable-electricidad>
- Chavarro Lara, J. D. (2019). *Modelación y simulación en CFD de una turbina Kaplan* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/39412>
- Clark, T. W. I., Isu, G., Gallo, D., Verdonck, P., y Morbiducci, U. (2015). Comparison of Symmetric Hemodialysis Catheters Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 26(2), 252-259.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2014.11.004>
- Combarro Marina, M. (2022). *Diseño de una turbina Kaplan y posterior simulación mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Cantabria]. <http://hdl.handle.net/10902/25346>
- Cruz Gavilan, Y., Valdés Hernández, P. A., Laffita Leyva, A., Gómez Águila, M. V., & Chuairey, C. M. (2020). Dinámica de Fluido Computacional: Revisión y análisis de las

aplicaciones en la ingeniería. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542020000400009&script=sci_arttext&lng=es

Delgado-Mejia, A. L., Olmos-villalba, L. C., & Rivero-mejia, S. E. (2014). Estudio comparativo del ciclo indicado de un motor diesel mediante simulación CFD y datos experimentales. *Revista UIS Ingenierías*, ISSN-e 2145-8456, ISSN 1657-4583, Vol. 13, No. 1, 2014 (*Ejemplar Dedicado a: Revista UIS Ingenierías*), Págs. 23-31, 13(1), 23–31.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6299677&info=resumen&idioma=ENG>

Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171–192.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>

Díaz Pinilla, L. I., Meneses Prado, L. P., y González Silva, G. (2019). Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. *Revista UIS Ingenierías*, ISSN-e 2145-8456, ISSN 1657-4583, Vol. 18, No. 2 (Abril - Junio), 2019, Págs. 237-244, 18(2), 237–244. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019022>

Díez, P. F. (n.d.). *Turbinas Hidráulicas*. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.
https://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf

Dixon, S. L., & Hall, C. A. (2010). Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 1–459.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-20205-4>

Egúsqüiza León, M. A. (2020) Diseño y simulación de un rotor para turbina hidrocínética de 15 kw aplicada al río Huallaga [Tesis de Título Profesional, Universidad de Ingeniería y Tecnología]. In *Repositorio Institucional UTEC*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12815/135>

- Forbes Staff. (6 de Junio 2023). *675 millones de personas sin acceso a electricidad, según ONU y Banco Mundial*. Forbes Mexico. <https://forbes.com.mx/675-millones-personas-acceso-electricidad-onu-banco-mundial/>
- Frank, T. (2005). Numerical simulation of slug flow regime for an air-water two-phase flow in horizontal pipes. *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*.
http://www.drthfrank.de/publications/2005/Frank_slug_flow_NURETH-11_2005.pdf
- Gallego Betancur, J. E. (2006) *Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generación de energía* [Trabajo de grado, Universidad EAFIT].
<http://hdl.handle.net/10784/4405>
- Garcia Sandoval, H. H. (2021) *Metodología para el modelado numérico de una micro central de generación hidroeléctrica impulsada por un vórtice gravitacional de agua* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/4978>
- Gaspari, F. J. (2007). Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.) [Tesis de maestría, Universidad Internacional de Andalucía]. In *Ediciones Cooperativas*.
<http://hdl.handle.net/10334/59>
- Gestión. (23 de abril de 2024). *Cerca de dos millones de peruanos no tienen energía eléctrica* | ECONOMIA | GESTIÓN. Economía. <https://gestion.pe/economia/cerca-de-dos-millones-de-peruanos-no-tienen-energia-electrica-noticia/>
- Góngora Cruz, L. A., y Rojas Macedo, O. G. (2019). *Diseño e Implementación de un Módulo de Turbina Francis para el Laboratorio de Termofluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica Y Mecatrónica* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María].
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8602>
- Gonzales Pareja, M. F., y Mejia Ramos, R. A. (2023) *Diseñar un banco de pruebas para turbinas de micro centrales hidroeléctricas constituido por una turbina Pelton de dos inyectores y una turbina Kaplan para la generación de 1 kW* [Tesis de suficiencia

- profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. <http://hdl.handle.net/10757/671146>
- González, B., y Suárez, O. (2001) *Comparación técnica y económica entre una turbina tipo Kaplan y tipo Semi-Kaplan para el proyecto Tocomá* [Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela]. <http://hdl.handle.net/10872/6897>
- González, G., Prieto, N., y Mercado, I. (2018). Large Eddy Simulation (LES) Aplicado a un lecho fluidizado gas – sólido. Parte I: Reactor a escala de laboratorio. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756967010>
- González Mora, I. D., Salinas Rodríguez, S. A., Guerra Gilbert, A., Sánchez Navarro, R., y Ríos Patrón, E. (2014). *Ríos libres y vivos, introducción al caudal ecológico y reservas de agua* (1 Ed.). SEMARNAT. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001908.pdf>
- Hernández Pasichana, S. M., y Posada Arrubla, A. (2018). Avances de la investigación sobre la gestión integral del recurso hídrico en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1079>
- Hernández Alfaro y Morales Solano (2017) *Diseño de una turbomáquina para el aprovechamiento de energía hidráulica en exceso en conducciones de agua potable* [Tesis de pregrado, Universidad Costa Rica]. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/5816>
- Hervás Ortega, J. (2019) *Modelado del flujo de una turbina hidráulica mediante la dinámica de fluidos computacional* [Tesis de pregrado, Universidad de Cantabria]. <http://hdl.handle.net/10902/16447>
- Ibañez Solís, L. E. (2019) *Diseño y construcción de una mini-turbina hidráulica tipo MICHELL – BANKI para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29767>

- Iovănel, R. G., Dehkharghani, A. S., y Cervantes, M. J. (2022). Numerical Simulation of a Kaplan Prototype during Speed-No-Load Operation. *Energies*, 15(14), 5072. <https://doi.org/10.3390/en15145072>
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., y Wiese, A. (2007). *Renewable Energy: Technology, Economics and Environment* (1 Ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>
- Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., & Wise, G. (2013). Green Energy Engineering. In *Exploring Engineering* (pp. 339–356). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415891-7.00016-9>
- Laín Beatove, S. (2014). La simulación numérica en problemas de ingeniería. *El Hombre y La Máquina*, 44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47832683001>
- León Méndez, J., Stefano, E., y Chirino Montano, J. (2023). Reducción de longitudes de tubería en la simulación CFD de flujos a través de accesorios. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 44(3), 2–15. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382023000300002
- Liu, X., Chen, W., Liu, L., & Liu, D. (2013). *The numerical simulation of oil-water two phase flow in horizontal pipeline based on the VOF model*. 741–745. <https://doi.org/10.1063/1.4816928>
- Mallitásig Panch, O. G. (2008) *Modelación y diseño digital para micro centrales de generación hidroeléctrica* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1073>
- Matovelle, C., & Heras, D. (2020). Análisis comparativo de las características morfométricas de sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, Ecuador. *Investigación y Ciencia: De La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, ISSN-e 1665-4412, No. 80, 2020, Págs. 22-31, 80, 22–31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7774550>

- McNay, J., y Hilditch, R. (2017). Evaluation of computational fluid dynamics (CFD) vs. target gas cloud for indoor gas detection design. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.018>
- Mehr, G., Durali, M., Khakrand, M. H., y Hoghooghi, H. (2021). A novel design and performance optimization methodology for hydraulic Cross-Flow turbines using successive numerical simulations. *Renewable Energy*, 169, 1402–1421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.090>
- Mendez, W., Pacheco, H., Cartaya, S., Marcano, A., y León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 133–156. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50213>
- Menny, Klaus. (1995). *Strömungsmaschinen*. Teubner Stuttgart.
- Meroney, R., Ohba, R., Leidl, B., Kondo, H., Grawe, D., y Tominaga, Y. (2016). Review of CFD Guidelines for Dispersion Modeling. *Fluids*, 1(2), 14. <https://doi.org/10.3390/fluids1020014>
- MINEM. (2023, March 22). *MINEM: el agua es el principal recurso para la generación de electricidad en el Perú - Noticias - Ministerio de Energía y Minas - Plataforma del Estado Peruano*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/729427-minem-el-agua-es-el-principal-recurso-para-la-generacion-de-electricidad-en-el-peru>
- Naranjo Sanchete, R. A., & Espinoza Román, H. G. (2008) *Elaboración de un modelo CFD de un generador eólico y validación experimental* [Tesis de grado, ESPOL]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31917>
- Nava Mastache, A. (2013). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas* (1 ed). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.udocz.com/apuntes/11135/selecci-n-y-dimensionamiento-de-turbinas-hidr-ulicas-para-centrales-hidroel-ctri>

- Ojeda Escoto, P. A., López Parra, M., Farah Simón, A., y Ramírez Reivich, A. C. (2009). CFD como una herramienta para diseño de productos. *MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, 431–442.
https://somim.org.mx/memorias/memorias2009/pdfs/A1/A1_215.pdf
- Peón Herrera, S. (2021) *Diseño y simulación de una turbina Kaplan mediante dinámica de fluidos computacional* [Tesis de fin de grado, Universidad de Cantabria].
<http://hdl.handle.net/10902/22073>
- Perico-Granado, N. R., González-Díaz, L. K., Arévalo-Algarra, H. M., y García-Puentes, C. D. (2023). Construcción de conocimiento sobre el agua y los ODS a partir del pensamiento crítico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 44(3).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382023000300069
- Pinochet, P. (4 de abril de 2015). *Turbina de Agua*. Plataforma Tecnológica.
<https://pinochetmorales.wordpress.com/2015/04/04/las-turbinas-de-agua/>
- Ramos Huatarongo, R. P., Ramos Salazar, J. A., y Sánchez Gallardo, A. A. (2020) Diseño de una turbina tipo sin fin para la iluminación del parque de Villa El Sol - La Oroya 2020 [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. In *Universidad Continental*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/9746>
- Raynal, L., Augier, F., Bazer-Bachi, F., Haroun, Y., y Pereira da Fonte, C. (2016). CFD Applied to Process Development in the Oil and Gas Industry – A Review. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 71(3), 42.
<https://doi.org/10.2516/ogst/2015019>
- Sánchez Antillón, A. (2009). Proceso de discernimiento de la unidad de análisis y muestreo en la investigación sobre el ideal formal y de contenido de los psicoanalistas. *Subjetividad y Procesos Cognitivos*, 13(2), 174–182.
<https://dspace.uces.edu.ar/jspui/handle/123456789/937>
- Sayma, abdulnaser. (2009) *Computational Fluid Dynamics*. Scientific Research Publishing.
<https://kosalmath.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/08/computational-fluid-dynamics.pdf>

- Sevilla Becerra, C. (2021) *Repositorio Institucional Pirhua - UDEP* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/4779>
- Valdivielso, A. (n.d.). *Cuenca hidrográfica de un río*. Agua. Retrieved January 26, 2025, from <https://www.iagua.es/respuestas/cuenca-hidrografica-rio>
- Versteeg, H. K., y Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2 Ed.).
- Zambrano Meza, H. J. (2016) *Influencia de los modelos de turbulencia en el comportamiento de reactores agitados por gas mediante el uso de la dinámica de los fluidos computacional (DFC)* [Tesis de doctorado, Universidad Central de Venezuela]. <http://hdl.handle.net/10872/22062>

ANEXOS

ANEXO A	MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	1
ANEXO B	DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FUNCIONAMIENTO	2
ANEXO C	RANS (REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES)	7

ANEXO A

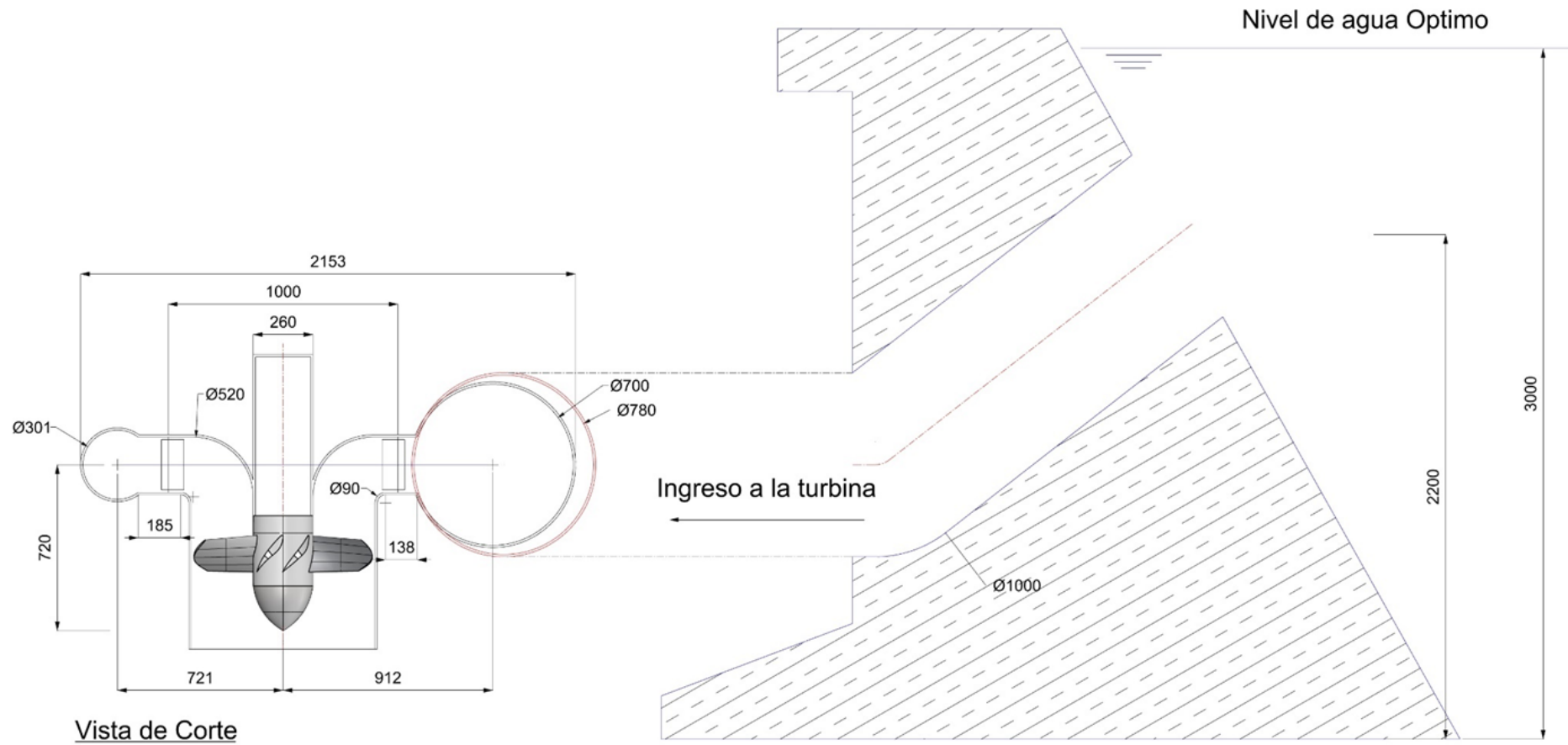
MATRIZ DE CONSISTENCIA

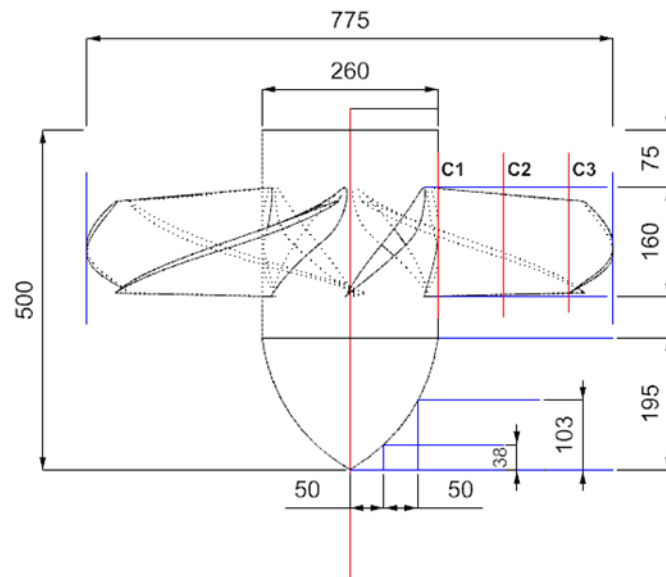
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿De qué manera el análisis numérico permite optimizar el coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan, considerando sus características geométricas y las condiciones hidráulicas del flujo?	Analizar una Micro Turbina Kaplan para optimizar el coeficiente de potencia mediante simulación numérica.	El coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan puede ser optimizado mediante el análisis geométrico y operativo, evaluado a través de simulaciones numéricas que consideran parámetros hidráulicos específicos.	V. Dep: Y1: Coeficiente de potencia de la Micro Turbina Kaplan evaluado bajo distintas condiciones hidráulicas mediante simulación numérica	Coeficiente de potencia de Micro Turbina Kaplan	• Potencia real generada • Potencia teórica disponible • Coeficiente de potencia (relación entre potencia real y teórica)	Tipo y nivel de Investigación: Tipo Aplicada Nivel descriptivo correlacional Unidad de análisis: Micro Turbina Kaplan diseñada específicamente para ríos de bajo caudal
Específicos: 1. ¿Cómo influye el diseño y modelado geométrico del rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan en su eficiencia y aprovechamiento energético en ríos de bajo caudal? 2. ¿Qué condiciones hidráulicas y de flujo deben caracterizarse mediante simulación numérica para identificar los parámetros operativos óptimos en ríos de bajo caudal? 3. ¿De qué manera la evaluación del coeficiente de potencia bajo distintas alturas de caída de agua permite validar la eficiencia de la Micro Turbina Kaplan para condiciones específicas de ríos de bajo caudal?	Específicos: 1. Diseñar y modelar geométricamente el rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan, considerando parámetros hidráulicos y operativos de ríos de bajo caudal. 2. Caracterizar hidráulicamente las condiciones hidráulicas y de flujo en ríos de bajo caudal mediante simulación numérica en ANSYS CFX, evaluando parámetros clave como velocidad y presión. 3. Evaluar el coeficiente de potencia de la Micro Turbina Kaplan bajo distintas alturas de caída de agua, utilizando herramientas de simulación numérica.	Específicos: 1. El diseño y modelado geométrico del rodete y los álabes de una Micro Turbina Kaplan, basado en parámetros hidráulicos y operativos de ríos de bajo caudal, influye significativamente en la optimización del coeficiente de potencia. 2. La caracterización hidráulica mediante simulación numérica en ANSYS CFX permite identificar condiciones óptimas de velocidad y presión en ríos de bajo caudal, impactando en el rendimiento de la turbina. 3. La evaluación del coeficiente de potencia de una Micro Turbina Kaplan bajo distintas alturas de caída de agua, realizada con herramientas de simulación numérica, valida su eficiencia y capacidad de aprovechamiento energético en ríos de bajo caudal.	V. Ind 1: X1: Características geométricas, hidráulicas y operativas de una Micro Turbina Kaplan diseñada para ríos de bajo caudal	Geometría de la Micro Turbina Kaplan en condiciones de contorno hidráulico Características de operación de la Micro Turbina Kaplan Interacción de fases de simulación numérica	• Tipo de perfil hidráulico del álabes • Largo de la álabes y radio del rotor • Ángulo de los álabes • Presión atmosférica • Caudal • Contorno de presiones sobre la superficie de perfiles • Densidad de agua • Velocidades de fluido • Área proyectada de turbina • Velocidad angular del rotor • Tipo de enmallado • Dominio computacional • Fuerzas sobre la superficie de perfiles • Torque	Procesamiento de datos: Simulación numérica CFD – Ansys CFX

ANEXO B

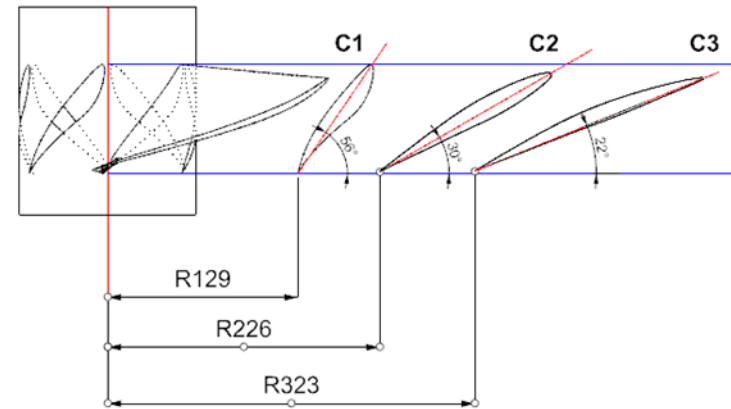
DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FUNCIONAMIENTO

En este anexo se presenta un diagrama simplificado de funcionamiento de la Micro Turbina Kaplan para ríos de bajo caudal elaborado por el autor.

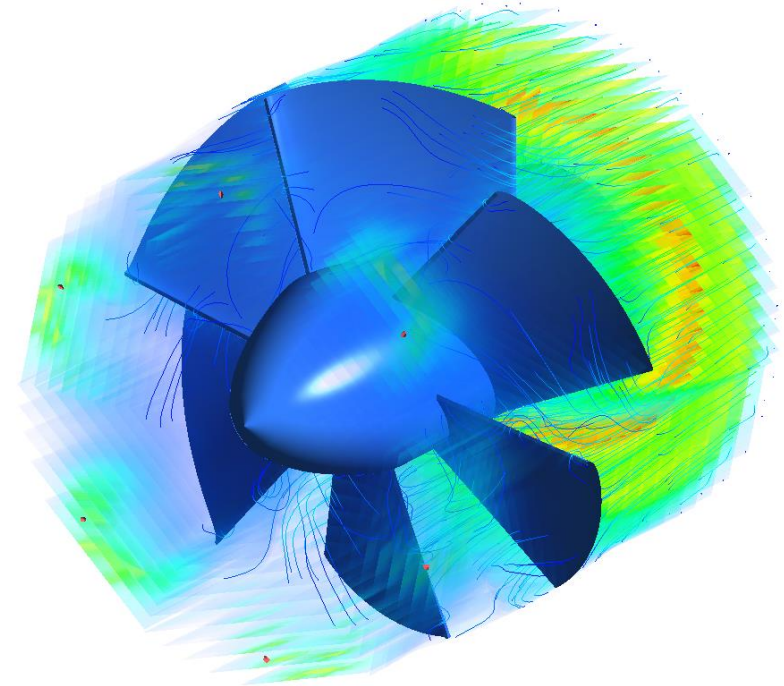
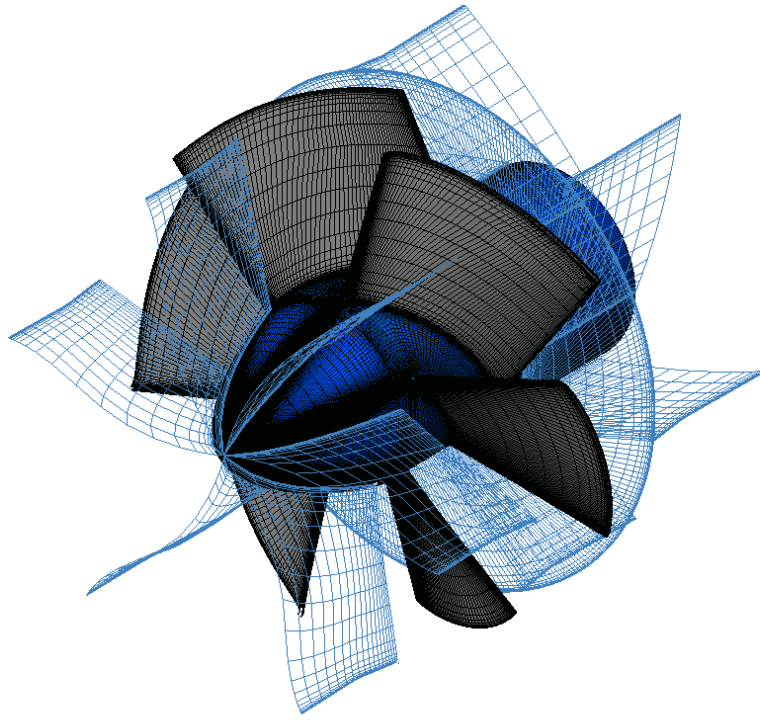


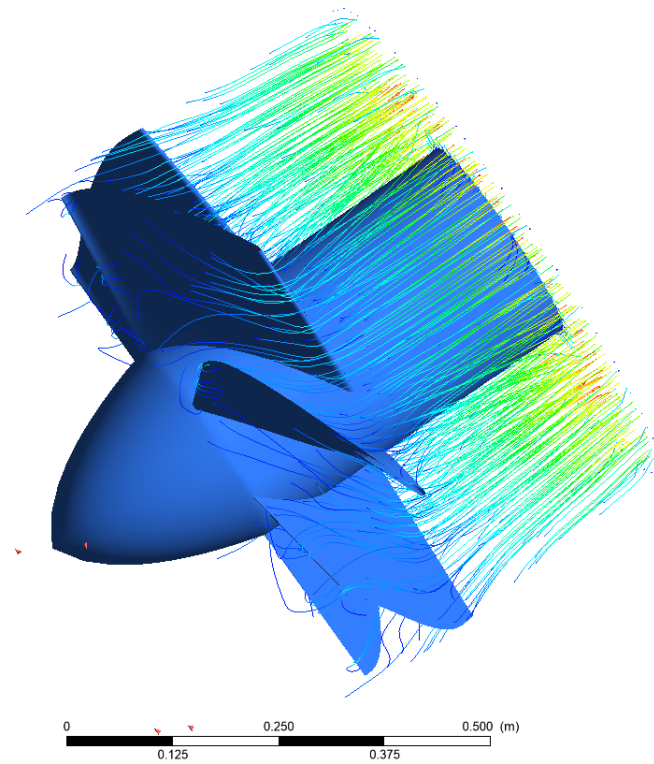
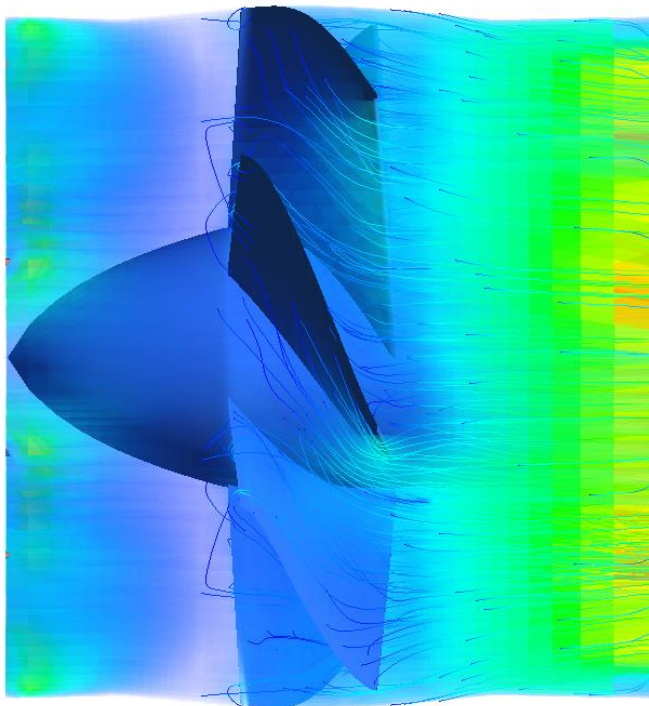


Vista Lateral



Corte Transversal del Alabe





ANEXO C

RANS (REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES)

Este enfoque se basa en la promediación de Reynolds, que permite modelar el comportamiento del flujo turbulento sin necesidad de resolver directamente todas las escalas de la turbulencia (como lo haría un DNS – Direct Numerical Simulation).

1. Fundamento del Enfoque RANS

La velocidad instantánea del fluido se descompone como:

$$\vec{u}(x, t) = \bar{\vec{u}}(x) + \vec{u}'(x, t) \quad (1)$$

- $\bar{\vec{u}}$: componente media (promedio de Reynolds)
- $\vec{u}'$: fluctuación turbulenta

Se aplica esto a las ecuaciones de Navier-Stokes, y al hacer el promedio temporal o estadístico, aparecen términos adicionales conocidos como esfuerzos de Reynolds (Reynolds stresses).

2. Ecuaciones RANS (en forma general)

La forma promediada de las ecuaciones de Navier-Stokes:

- **Conservación de masa:**

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

- **Conservación de cantidad de movimiento:**

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (3)$$

El nuevo término:

$\overline{u'_i u'_j}$ (Tensor de esfuerzos de Reynolds) es desconocido, y necesita ser modelado.

3. Modelado de la Turbulencia en RANS

Para cerrar el sistema de ecuaciones, se emplean **modelos de turbulencia**. Entre los más usados:

Modelos basados en viscosidad turbulenta:

- **Modelo $k-\epsilon$ (k-epsilon)**

Dos ecuaciones: energía cinética turbulenta k y tasa de disipación ϵ .

- **Modelo $k-\omega$ (k-omega)**

Dos ecuaciones: k y frecuencia específica de disipación ω .

- **SST (Shear Stress Transport)**

Combina $k-\omega$ cerca de paredes y $k-\epsilon$ en regiones alejadas del muro

Modelo RSM (Reynolds Stress Model)

Modela directamente las componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds – más preciso, pero más costoso computacionalmente.

4. Aplicación en Ingeniería

El enfoque RANS es estándar en simulaciones numéricas CFD (como ANSYS Fluent o OpenFOAM) para:

- Evaluar flujo alrededor de embarcaciones.
- Simular comportamiento de turbinas hidráulicas (hidrocinéticas o Kaplan)
- Análisis de flujo en estructuras portuarias o cascos de buques.

5. Conclusión

El enfoque RANS turbulento es fundamental en la ingeniería computacional de fluidos. Se aborda con eficiencia flujos complejos sin resolver cada detalle de la turbulencia, siempre que se seleccione un modelo de turbulencia adecuado al caso práctico.