

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UNA TURBINA MICHELL-BANKI
UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL**

Javier Andrés Palacio Ardila

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Mecánico.

Director

Manuel de Jesús Martínez

PhD Mecánica computacional

Codirector

Manuel Salvador Acosta Castro

Ingeniero mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Dedicatoria

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional, sus sacrificios y su constante apoyo en cada etapa de este camino. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la disciplina y la perseverancia, y por brindarme siempre la confianza necesaria para alcanzar mis metas. Este logro es reflejo de todo lo que han sembrado en mí.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por ser mi base en los momentos difíciles y mi mayor motivación para seguir adelante; gracias por estar siempre presentes, por su paciencia, sus consejos y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Cada paso de este camino ha sido más llevadero gracias a su amor y respaldo constante.

A mis compañeros y amigos, por su compañía a lo largo de este proceso y por los momentos compartidos que hicieron más ameno este camino.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme una formación integral y las herramientas necesarias para mi desarrollo académico y profesional, así como por ofrecer un entorno que fomenta el conocimiento, la investigación y el crecimiento personal.

A todos los docentes que hicieron parte de este proceso, por compartir sus conocimientos, su experiencia y su compromiso con la formación de futuros profesionales, dejando en mí enseñanzas que trascienden el aula.

A mi director, Manuel de Jesús Martínez, por su guía constante, su disposición para orientar este trabajo y sus valiosos aportes, que fueron clave para el desarrollo y la culminación de esta investigación.

A mi codirector, Manuel Salvador Acosta, por su apoyo, sus recomendaciones y su acompañamiento durante este proceso, contribuyendo significativamente al fortalecimiento de este proyecto.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	13
2. Objetivos.....	16
2.1 Objetivo general.....	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. Marco teórico.....	17
3.1 Turbina Hidráulica	17
3.1.1 Clasificación turbinas Hidráulicas	17
3.1.2 Componentes Clave de la Turbina Hidráulica	18
3.2 Turbina Michell Banki	19
3.3 Tipos de Flujo en Turbinas.....	20
3.4 Numero de Reynolds.....	21
3.5 Método de Volúmenes Finitos.....	22
3.6 Ecuaciones de Navier-Stokes.....	23
3.7 Potencia y rendimiento de una turbina.....	25
3.8 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	26
3.8.1 Preprocesamiento	26
3.8.2 Procesamiento	27
3.8.3 Posprocesamiento	27
3.8.4 Ansys Fluent.....	28

	5
SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI	
3.9 Mallado	28
3.9.1 Tipos de malla	28
3.9.2 Estudio de convergencia de malla.....	31
3.10 Modelos de turbulencia.....	31
4. Antecedentes.....	33
4.1 Antecedentes locales	33
4.2 Antecedentes internacionales	33
5. Metodología.....	35
5.1 Geometría y condiciones de operación	35
5.2 Dominio computacional.....	37
5.3 Mallado del modelo CFD.....	38
5.4 Set up	42
5.5 Modelado y simulación.....	46
5.6 Validación de la simulación	47
5.7 Convergencia de malla.....	48
5.8 Determinación del potencial eléctrico de la turbina	49
5.9 Postprocesamiento	49
6. Resultados.....	52
6.1 Validación del modelo CFD.....	52
6.2 Convergencia de malla.....	55

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

6.3 Potencia eléctrica de la turbina	56
6.4 Postprocesamiento de la simulación	63
6.4.1 Estructura y corrientes de flujo	63
6.4.2 Contornos de velocidad y presión.....	64
7. Conclusiones.....	68
8. Recomendaciones	72
Referencias bibliográficas.....	74
Apéndices.....	77

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución de las fuentes de energía eléctrica en Colombia.....	13
Figura 2. Representación de una central hidroeléctrica	14
Figura 3. Turbina hidráulica y sus componentes	19
Figura 4. Representación de la turbina Mi chell-Banki	20
Figura 5. Representación esquemática de los tipos de flujo	22
Figura 6. Ilustración metodo de volúmenes finitos.....	23
Figura 7. Ilustración malla estructurada	29
Figura 8. Malla no estructurada	30
Figura 9. Vista isométrica de la turbina	36
Figura 10. Vista frontal de la turbina	36
Figura 11. Dominio computacional creado para el rodete de la turbina	37
Figura 12. Mallado general de la turbina.....	38
Figura 13. Vista detallada mallado del rodete.....	39
Figura 14. Rango de valores para parámetros de calidad	40
Figura 15. Orthogonal Quality del mallado realizado	41
Figura 16. Skeness del mallado realizado.....	41
Figura 17. Interfaz set up de Ansys.....	42
Figura 18. Propiedades del flujo a analizar.....	43
Figura 19. Definición del modelo de turbulencia	44
Figura 20. Parámetros numéricos del modelo	45
Figura 21. Configuración del proceso iterativo	46
Figura 22. Opción frame motion.....	47

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 23. Herramientas para el monitoreo de variables	48
Figura 24. Interfaz results de Ansys.....	50
Figura 25. Herramientas utilizadas para el postprocesamiento	51
Figura 26. Residuales del modelo CFD	52
Figura 27. Flujo másico de entrada.....	53
Figura 28. Flujo másico a la salida	53
Figura 29. Resultados experimentales reportados por autores	54
Figura 30. Gráfica RPM vs Eficiencia obtenida de la simulación.....	55
Figura 31. Gráfica comportamiento del torque.....	57
Figura 32. Triángulo de velocidades del rodete.....	58
Figura 33. Consumo de energía eléctrica por habitante en Colombia	62
Figura 34. Líneas de corriente desarrolladas durante la simulación.....	63
Figura 35. Campo de velocidad arrojado por la simulación.....	65
Figura 36. Contorno de presión dado por la simulación numérica.....	66

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros geométricos de la turbina	35
Tabla 2. Resultado convergencia de malla	56
Tabla 3. Parámetros iniciales de la turbina.....	57
Tabla 4. Comparación datos experimentales de la simulación vs teóricos	60

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Lista de Apéndices

Apéndice A.Plano rodete de la turbina	77
Apéndice B.Plano inyector de la turbina	78
Apéndice C.Plano álabe	79

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Resumen

Título: Evaluación del rendimiento de una turbina Michell-Banki utilizando dinámica de fluido computacional.**

Autor: Javier Andrés Palacio **

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, CFD, Turbina Michell-yanki, Simulación, Eficiencia, Potencia eléctrica

Descripción: En muchas regiones del país, se encuentran poblaciones en su mayoría de difícil acceso, privadas de energía eléctrica, ya sea por su ubicación remota, o simplemente por la falta de inversión del estado en una planta hidroeléctrica que les permita suplir esta necesidad, a pesar que en la mayoría de casos, estas poblaciones cuentan con los recursos hídricos necesarios para ello. La turbina Michell-Banki surge como una opción para dar solución a este problema, pues tiene la capacidad de generar una potencia eléctrica útil, con bajos caudales y sin llegar a significar una alta inversión económica.

Es por ello, que para este proyecto se planteó estudiar el comportamiento y rendimiento de este tipo de turbina mediante la Dinámica de fluidos computacional utilizando ANSYS Fluent, bajo unas condiciones de caudal de 10 L/s y una altura de 15 metros. Esta simulación se llevó a cabo utilizando el modelo de turbulencia SST $k-\omega$, y se contrastó evaluando algunas de variables arrojadas por la simulación, y comparando los resultados y las tendencias obtenidas con las presentes en otros estudios.

Los resultados permitieron identificar que, para velocidad angular de 400 RPM, la turbina alcanza su punto máximo de rendimiento, con una capacidad de generación de potencia eléctrica de la turbina entre los 500 y 600 Watts, con una eficiencia de aproximadamente del 40%. Que se traduce en 218 W y 1914 kWh, lo que permitiría suministrar este recurso a hogares o locaciones pequeñas que no cuenten con este recurso.

** Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel de Jesús Martínez. PhD, Mecánica Computacional. Codirector: Manuel Salvador Acosta. Ingeniero Mecánico.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Abstract**Title:** Performance Evaluation of a Michell-Banki Turbine Using Computational Fluid Dynamics***Author:** Javier Andrés Palacio****Keywords:** Computational Fluid Dynamics, CFD, Michell-bani Turbine, Simulation, Efficiency, Electrical Power

Description: In many regions of the country, there are populations—mostly located in hard-to-access areas—that lack access to electricity, either due to their remote location or simply because of insufficient government investment in hydroelectric infrastructure to cover this need. This happens despite the fact that, in many cases, these communities have the necessary water resources available. In this context, the Michell-Banki turbine emerges as a viable alternative to address this issue, as it is capable of generating useful electrical power with low flow rates and without requiring a high economic investment.

For this reason, this project it was proposed to study the behavior and performance of this type of turbine through Computational Fluid Dynamics (CFD) using ANSYS Fluent, under operating conditions of a flow rate of 10 L/s and a head of 15 meters. The simulation was carried out using the SST $k-\omega$ turbulence model, and the results were analyzed by evaluating several variables obtained from the simulation and comparing the results and trends with those reported in other studies.

The results showed that, at an angular velocity of 400 RPM, the turbine reaches its maximum performance point, with an electrical power generation capacity between 500 and 600 W and an efficiency of approximately 40%. This corresponds to a useful power output of about 218 W and an estimated annual energy production of 1914 kWh, which could be sufficient to supply electricity to small locations that lack access to this resource.

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engeeniring. Director: Manuel de Jesús Martínez. PhD, Computational Mechanics. Codirector: Manuel Salvador Acosta. Mechanical Engineer

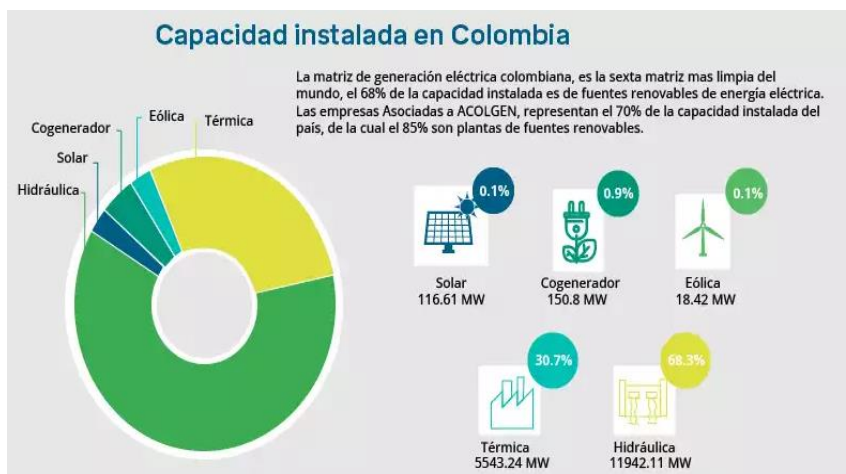
SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

1. Introducción

En Colombia, cerca del 68% de energía eléctrica es generada por centrales hidroeléctricas, esto gracias a su riqueza en recursos hídricos, con elevados índices de pluviosidad y una topografía especial. En por ello, que desde la década de los 70's la construcción de este tipo de plantas se han convertido en uno de los proyectos más atractivos para fomentar el desarrollo sostenible (Austria & González, 2022).

Figura 1.

Distribución de las fuentes de energía eléctrica en Colombia

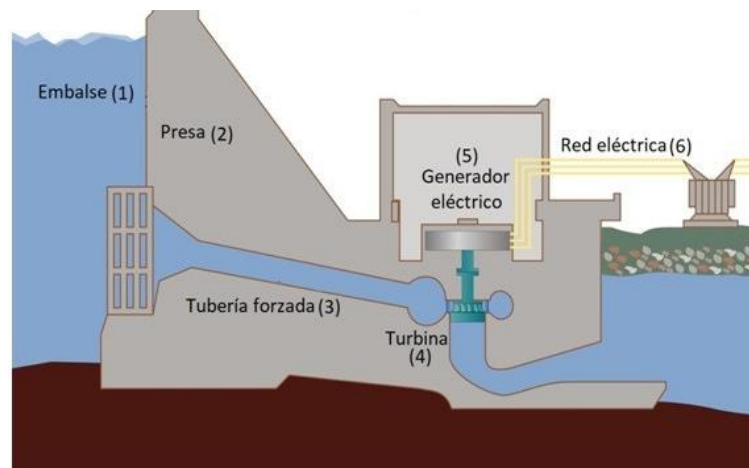


Para la generación de energía en las centrales hidroeléctricas, es fundamental el funcionamiento de las turbinas. Estas, a través de la rotación de sus aspas, convierten la energía cinética del agua en energía mecánica que es aprovechada por un generador conectado a la turbina, que la transforma en energía eléctrica útil.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 2.

Representación de una central hidroeléctrica



Nota: Tomado de Inexperta [Sitio Web]

<https://ingeoexpert.com/2018/03/22/como-funciona-una-central-hidroelectrica/>

En el mercado y la industria se pueden encontrar diferentes tipos de turbinas, entre ellas destaca la turbina Michell Banki, también conocida como turbina de flujo cruzado la cual, por su diseño sencillo y facilidad en su construcción (Romero et al., 2020). Además, sus bajos costos de mantenimiento y larga vida útil (entre 40 y 50 años) (Mereke et al., 2024) la hacen ideal para proyectos a pequeña escala, como el suministro de energía eléctrica a poblaciones que aún no cuentan con este servicio.

Para el diseño y construcción de este tipo de máquinas, es necesario realizar pruebas a escala que permitan comprobar el funcionamiento del equipo que se va a realizar y si efectivamente va a cumplir con la función que se requiere. Sin embargo, la realización de estos ensayos y construcción de prototipos significa un considerable gasto económico y de tiempo que puede retrasar el desarrollo del proyecto.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Por esta razón, se requiere de otras herramientas que permitan evaluar el comportamiento del equipo y determinar si una vez diseñado y construido va a cumplir con las expectativas planteadas. Dentro de dichas herramientas, se destaca la dinámica de fluidos computacional o “CFD” por sus siglas en inglés, la cual permite modelar y simular el flujo a través de un diseño bajo condiciones específicas arrojando datos muy cercanos a los que se pueden encontrar en el funcionamiento real.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el rendimiento energético de una turbina Michell-Banki bajo condiciones de operación específicas?

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el rendimiento energético de una turbina Michell-Banki bajo condiciones específicas utilizando dinámica de fluidos computacional.

2.2 Objetivos específicos

Establecer las condiciones de operación y dimensionamiento de la turbina, para un rango de caudal de 5 a 20 LPS y altura energética entre 6 a 15 metros, características típicas de una nano-central.

Desarrollar un modelo CFD para la simulación de los campos de velocidad y presión en la turbina, considerando parámetros como: Modelo de turbulencia, régimen de flujo, densidad de malla, entre otros.

Validar los resultados de la simulación y contrastándolos con otros resultados presentes en el estado del arte

Determinar la potencia y eficiencia de la turbina mediante cálculos relacionados, utilizando los resultados arrojados por la simulación.

3. Marco teórico

3.1 Turbina Hidráulica

Es una maquina hidráulica de tipo motriz, capaz de convertir energía hidráulica proveniente del agua en energía mecánica rotacional, utilizada para la generación de energía eléctrica en un generador.

Este tipo de turbomáquinas, son de vital importancia para el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas, las cuales, como se ha mencionado, representan cerca del 68% de la matriz energética del país(Austria & González, 2022). Esto se debe, en gran medida, a la facilidad geográfica para la instalación de este tipo de plantas, y la abundancia de recursos hídricos.

3.1.1 Clasificación turbinas Hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar teniendo en cuenta diferentes aspectos (Fernández Díez, s/f) :

Según la variación de presión en el rodete:

- Turbinas de acción: El agua sale del distribuidor a presión atmosférica y llega al rodete con esta misma de presión, por lo tanto, toda la energía potencial proveniente de la caída del agua se transmite al rodete en forma de energía cinética. Un ejemplo de estas son las turbinas Pelton y de flujo cruzado
- Turbinas de reacción: El agua sale del distribuidor a una determinada presión, que va disminuyendo a medida que el fluido atraviesa los alabes del rodete, de tal manera que, a la salida del mismo, se tiene una presión casi nula o incluso negativa. En este tipo de turbinas, el agua circula por el distribuidor y el rodete a presión, por lo que la energía potencial generada por la caída del fluido se transforma tanto en energía

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

cinética como en energía de presión. Algunos ejemplos de este tipo de turbinas son la Kaplan y Francis.

Según la dirección de entrada del fluido:

- **Axiales:** El flujo de agua entra de manera paralela al eje de la turbina.
- **Radiales:** El agua ingresa perpendicularmente al eje de la turbina
- **Mixtas:** Es una combinación entre las turbinas de tipo radial y de tipo axial
- **Tangenciales:** El flujo de agua ingresa de manera tangencial contra las palas o cucharas de la rueda.

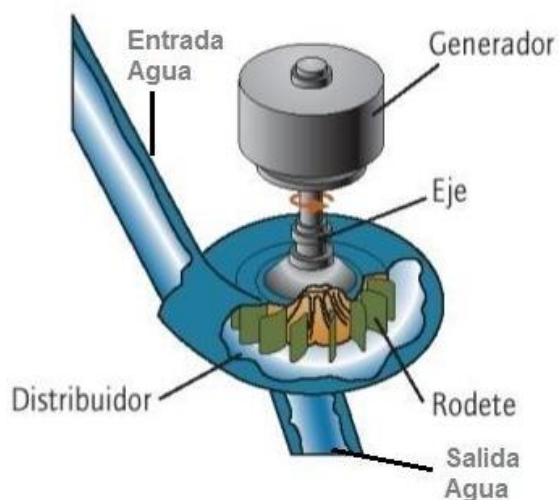
3.1.2 Componentes Clave de la Turbina Hidráulica

- **Rodete:** Este es el corazón de la turbina. Se trata de un disco que cuenta con palas o álabes y gira a una velocidad específica. Su función principal es transformar la energía cinética del agua en trabajo mecánico. La eficiencia del rodete es crucial, ya que determina cuánta energía se puede extraer del flujo de agua.
- **Distribuidor:** Este componente fijo no realiza trabajo mecánico ni gira. Su función es acelerar el flujo de agua, convirtiendo su energía potencial en energía cinética antes de que llegue al rodete. Un diseño eficiente del distribuidor puede mejorar notablemente el rendimiento de la turbina.
- **Tubo de Aspiración:** Este elemento se encuentra típicamente en turbinas de reacción y se instala después del rodete, con una forma divergente. Su propósito es optimizar el flujo del agua, facilitando su transición desde el rodete hacia el sistema de salida. Esto es vital para maximizar la eficiencia hidráulica.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 3.

Turbina hidráulica y sus componentes



Nota: Tomado de (*Turbinas Hidráulicas*, 2015)

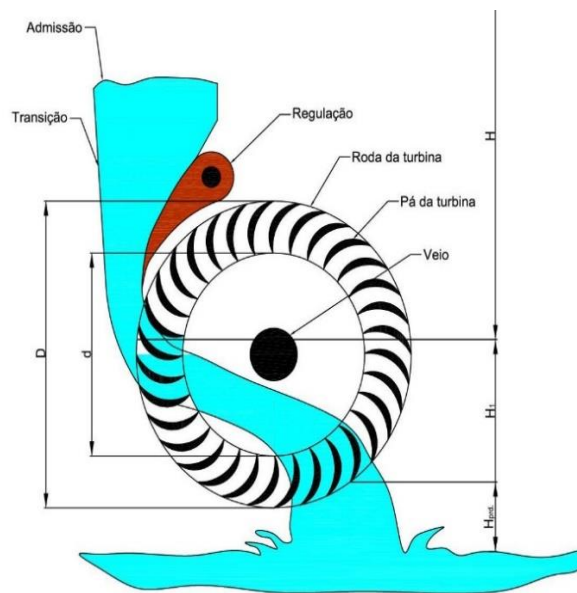
3.2 Turbina Michell Banki

Es una turbina de acción de flujo transversal, utilizada generalmente en pequeñas centrales hidroeléctricas en donde se aprovecha un caudal medio para alimentar un sistema eléctrico (Hernández & Indacochea, 1988). En Colombia, en comparación de los otros tipos de turbina, la Michell-Banki aún no ha sido tan utilizada, por lo que se podría decir que es aún desconocida para mucho. Sin embargo, esta puede jugar un papel fundamental en pequeños proyectos hidroeléctricos dado su menor impacto ambiental y social (Orge et al., 2008).

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 4.

Representación de la turbina Michell Banki



Nota: Tomado de *IG Energy* [Sitio Web]

<https://igenergypower.com/energiasalternativas/vodnimotory/banki.html>

3.3 Tipos de Flujo en Turbinas

Al estudiar turbinas, es fundamental reconocer los distintos tipos de flujo que pueden presentarse:

- **Flujo Laminar:** Este tipo de flujo se caracteriza por un movimiento suave y ordenado. En este caso, las capas del fluido se deslizan unas sobre otras sin generar turbulencias significativas (Cengel & Cimbala, 2004). En las turbinas, el flujo laminar puede ser beneficioso, ya que reduce las pérdidas por fricción.
- **Flujo Turbulento:** Cuando la velocidad del fluido aumenta o se producen cambios en la geometría del sistema, el flujo puede volverse turbulento. Este tipo de flujo es más caótico

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

y, aunque puede incrementar la transferencia de energía, también genera pérdidas adicionales debido a la fricción.

- **Flujo Transicional:** Este estado se sitúa entre el flujo laminar y el turbulento.

Comprender las condiciones en las que ocurre esta transición es crucial para optimizar el rendimiento de la turbina.

3.4 Numero de Reynolds

Se define como un valor adimensional el cual establece la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido en movimiento, y su magnitud depende principalmente de la densidad, la viscosidad, la velocidad del fluido, y las dimensiones de la corriente.

Para el cálculo del Número de Reynolds se utiliza la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad [1]$$

Donde:

V = Velocidad del fluido

D = Diámetro Hidráulico

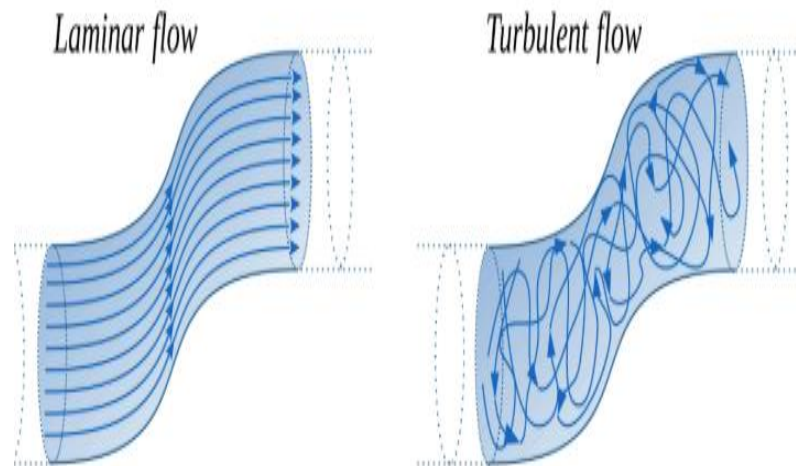
ν = Viscosidad cinemática

Según el valor del número de Reynolds es posible determinar el régimen del flujo correspondiente bajo los siguientes parámetros:

- Si $Re < 2300$ se considera un régimen del flujo laminar
- Si $2300 \leq Re \leq 10000$ se considera régimen de flujo transitorio
- Si $Re > 10000$ se considera régimen de flujo turbulento

Figura 5.

Representación esquemática de los tipos de flujo



Nota: Tomado de Cadence Design Systems [Sitio Web]

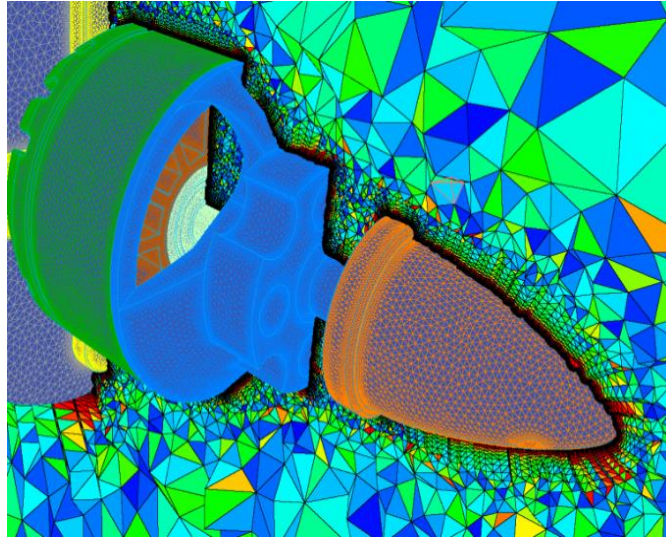
<https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-calculating-laminar-flow-reynolds-number-and-its-limits>

3.5 Método de Volúmenes Finitos

Consiste en dividir un cuerpo en n volúmenes de control empleando una malla, en la cual las propiedades se encuentran definidas en el centro de los volúmenes de control, mientras que en sus fronteras existen flujos másicos y de calor. Posteriormente se formulan las respectivas ecuaciones que gobiernan su comportamiento y estas son discretizadas empleando distintos métodos numéricos, seguidamente, se aproximan los valores de las variables en las caras con diferentes modelos de interpolación y finalmente se ensambla y resuelve el sistema algebraico obtenido. (Osses, 2016)

Figura 6.

Ilustración método de volúmenes finitos



Nota: Tomado de (Osses, 2016)

3.6 Ecuaciones de Navier-Stokes

Propuestas por el físico y matemático irlandés George Gabriel Stokes y el físico francés Claude-Lois Marie Henri Navier en el siglo XIX; Las ecuaciones de Navier-Stokes son un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, permiten describir el movimiento de un fluido a través del tiempo. Debido a la complejidad e importancia de este sistema, y la solución del mismo, el instituto Clay de matemáticas lo ha catalogado como uno de los problemas del milenio. (Moreno, 2022)

Estas ecuaciones, se obtienen a partir de los principios de fundamentales de la mecánica de fluidos, más específicamente, la conservación de masa, la conservación de cantidad de movimiento y la conservación de energía.

- **Ecuación de continuidad:** Esta ecuación se obtiene a partir del principio de que la masa dentro de un volumen de control no cambia a menos que exista un flujo de masa que

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

entre o salga. Para un fluido incompresible, esta ecuación se representa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho * V) = 0 \quad [2]$$

Donde:

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ = Variación de la densidad con el tiempo

∇ = Divergencia del flujo de masa

V = Representa del vector velocidad del fluido

Expresada en coordenadas cartesianas:(Perezagua, 2023)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [3]$$

Donde u, v y w corresponden a las componentes de velocidad en las direcciones x, y y z respectivamente.

- Ecuación de cantidad de movimiento: Estas ecuaciones se basan en la segunda ley de Newton $F = m * a$ aplicada a un fluido. Esta se expresa vectorialmente de la siguiente forma:(Perezagua, 2023)

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho \vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad [4]$$

Donde:

$\frac{\partial V}{\partial t}$ = Gradiente de velocidad respecto al tiempo

∇P = Delta de presión del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Teniendo en cuenta cada componente para coordenadas cartesianas, las ecuaciones de movimiento se representan así:

Componente x:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad [5]$$

Componente y:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad [6]$$

Componente z:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad [7]$$

3.7 Potencia y rendimiento de una turbina

En las turbinas hidráulicas es fundamental el concepto de potencia hidráulica, la cual, se define como la energía transmitida o transformada por el fluido en una unidad de tiempo, y se describe mediante la siguiente ecuación: (TecnoTurbinas, 2007)

$$P_H = \rho * g * Q * h \quad [8]$$

Donde:

P_H = Potencia hidráulica [Kw]

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

ρ = Densidad de fluido [Kg/m^3]

Q= Caudal del fluido [m^3/s]

h = Altura de caída o salto del fluido [m]

Teniendo claro lo anterior, se puede determinar la potencia propia de la turbina, en la cual se tiene en cuenta la eficiencia de la misma, considerando todas las perdidas presentadas. Esta relación se representa mediante la siguiente expresión matemática:

$$P_T = P_H * \eta_T \quad [9]$$

Donde:

P_T = Potencia de la turbina [Kw]

η_T = Eficiencia de la turbina

3.8 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional, comúnmente conocida como CFD, es una herramienta esencial en el campo de la ingeniería. Su principal función es permitir la simulación del comportamiento de los fluidos en diferentes escenarios. A través del uso de las ecuaciones de Navier-Stokes, la CFD facilita el análisis del flujo en geometrías complejas, como las que se encuentran en las turbinas hidráulicas. Esta metodología resulta particularmente útil para el diseño y la optimización de turbinas Michell-Banki, ya que permite prever su rendimiento sin necesidad de construir prototipos físicos, lo que ahorra tanto tiempo como recursos.

3.8.1 Preprocesamiento

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

El proceso de preprocesamiento de una simulación por dinámica de fluidos computacional, implica toda la construcción y preparación de la geometría, que representara todo el dominio computacional del fluido que se desea analizar; así como todas la propiedades y parámetros del flujo.

Dentro de esta etapa se llevan a cabo procesos específicos como: Creación del dominio de fluido, generación de la malla, definición de las condiciones de frontera de la geometría y de las propiedades del fluido (Viscosidad, densidad, etc.), así como el establecimiento de los modelos físicos (Tipo de flujo, modelo de turbulencia).

3.8.2 Procesamiento

Una vez definidos todos los parámetros geométricos y físicos del sistema, es posible llevar a cabo toda la etapa de procesamiento, que es donde se ejecutara todo el modelado CFD, y se resolverán mediante el software las ecuaciones que gobiernan el flujo (continuidad, cantidad de movimiento y energía) sobre la malla que se definió previamente

3.8.3 Posprocesamiento

Esta es la etapa de tratamiento y análisis de los resultados arrojados por la simulación. En esta fase los datos numéricos son transformados en representaciones gráficas y visuales, tales como contornos, vectores y líneas de corriente, que permiten comprender el comportamiento del flujo. Facilitando la evaluación de variables como presión, velocidad y otras magnitudes de interés, con el fin de validar la coherencia de los resultados y extraer conclusiones relevantes para el estudio.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

3.8.4 Ansys Fluent

Ansys Fluent es un software de simulación CFD que permite predecir el comportamiento del flujo de fluidos, la transferencia de calor, reacciones químicas y otros fenómenos relacionados; Para ello, incluye características y capacidades necesarias para este tipo de procesos, como el modelado de turbulencia, mallado de geometría, simulaciones multifásicas, dinámica de partículas, entre otras.

3.9 Mallado

Es la subdivisión del dominio de la geometría en pequeñas celdas o elementos compuestos por nodos y aristas que al juntarlas forman diferentes superficies, que pueden ser triángulos o cuadriláteros y en las que cada una de ellas representa un espacio discreto que modela el flujo en cuestión de manera local, y sobre las que posteriormente se aplican ecuaciones matemáticas que representan la física del flujo en cada una de las celdas de la malla.(Lintermann, 2020)

Al aumentar el número de elementos, y por consiguiente reducir el tamaño de ellos, implica al mismo tiempo reducir la distancia entre cada uno de los nodos, lo que hará que la interpolación entre ellos sea mucho más exacta; Sin embargo, esto elevará el consumo de recursos computacionales.(Gómez González, s/f)

3.9.1 Tipos de malla

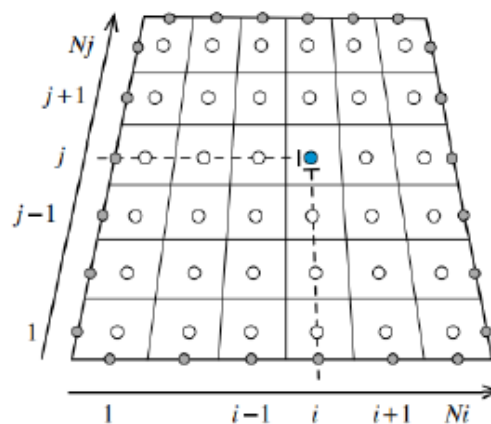
Como se mencionó, el mallado es utilizado para discretizar el dominio de la geometría; Esto se puede realizar mediante dos tipos de malla:

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

- Estructurada: Este tipo de mallado se construye de manera manual a partir de una gran geometría que se va discretizando poco a poco en bloques más pequeños, los cuales, se van adaptando a las superficies del modelo. (Maria & Sarrazin, 2016)

Figura 7.

Ilustración de una malla estructurada

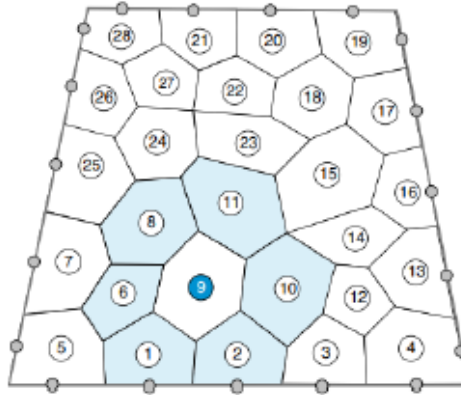


Nota. Tomado de *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics* (p.147),

por F. Moukalled, et al., 2016, Springer.

- No estructurada: Este tipo de malla es construida automáticamente por el programa utilizado alrededor de modelo utilizando diferentes métodos, y se suelen usar cuando se trata de geometrías mucho más complejas.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 8.*Malla no estructurada*

Nota. Tomado de *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics* (p.147), por F. Moukalled, et al., 2016, Springer.

Una de las grandes de las ventajas de las mallas no estructuradas es que permiten realizar un refinado local, sin afectar la distribución de las celdas fuera de la zona en cuestión. Esto permite llevar a cabo estrategias de adaptación de malla, ya sea para refinar localmente, o para reducir el número de celdas.

Se considera la forma más “Natural” de dar solución a un flujo determinado, ya que generalmente se encuentra alineado con las direcciones principales de la malla, siguiendo de esta forma las líneas de corriente.

Una de las mayores ventajas en el uso de un mallado estructurado es su morfología, que es ideal para la extensión a dominios tridimensionales. En primer lugar, porque economiza el número de celdas, pues para una densidad de malla equivalente, los mallados estructurados están formados por un menor número de celdas a comparación de los no estructurados. En segundo lugar, pueden ser extruidos según la dirección que

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

se prefiera, permitiendo de esta forma un mallado completamente regular en todas las direcciones. (Fernández, 2012)

3.9.2 Estudio de convergencia de malla

Consiste al proceso de simulación de una geometría, utilizando diferentes tamaños de elementos en el mallado, con el fin de garantizar una mayor precisión en los resultados. Para ello, se realiza el primer mallado de la geometría, y partir de él, se realizan pruebas con una malla cada vez más refinada y con menor tamaño de sus elementos, para finalmente comparar los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones y observar si hubo un cambio significativo.

3.10 Modelos de turbulencia

En el ámbito de la ingeniería, la mayoría flujos son de naturaleza turbulentos, por lo que para aplicaciones como el análisis Dinámica de fluidos computacional (CFD), es de vital importancia modelar correctamente la turbulencia, de forma que se puedan obtener resultados significativos y confiables.

Este tipo de modelos, fueron elaborados con el objetivo de poder representar todos los efectos del flujo turbulento sin la necesidad de resolver todas las fluctuaciones de velocidades y vorticidades propias de la realidad; Las cuales, podrían ser resueltas con exactitud mediante una simulación numérica directa (DNS), pero ello implicaría un refinamiento de malla extremadamente alto.

Los modelos de turbulencia más comunes en aplicaciones ingeniería son:

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Modelo k-epsilon ($k-\epsilon$): Es uno de los modelos más utilizados en ingeniería debido a su simplicidad y robustez, y se basa en los conceptos de energía cinética y disipación de energía. De forma que calcula la producción de energía cinética y la disipación de la misma, para finalmente determinar la energía turbulenta del flujo con base en estas variables.

Modelo k-Omega: Es un modelo similar al k-epsilon, pues al igual que este, utiliza la energía cinética del flujo, sin embargo, este modelo a diferencia del mencionado anteriormente utiliza la tasa de cambio en la frecuencia de rotación. Por lo que permite una representación más exacta del comportamiento del flujo en las paredes, así como regiones en las que la turbulencia se desarrolla desde condiciones iniciales.

Modelo RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes): En lugar de resolver directamente todas las fluctuaciones turbulentas (como podría ser en una simulación numérica directa), se descompone el flujo en una parte media y una parte fluctuante, de forma que al promediar las ecuaciones de Navier-Stokes bajo este enfoque, se simplifique la formulación de los flujos turbulento.

4. Antecedentes

4.1 Antecedentes locales

- **Recomendaciones para la realización y análisis de pruebas experimentales en turbinas hidráulicas tipo Michell-Banki (2024):** El estudio se centra en la caracterización experimental de una turbina Michell-Banki construida a escala de laboratorio. Se detallan los métodos utilizados para medir variables críticas en la generación de energía, así como la configuración del rodete de la turbina y su rendimiento. Los resultados indican que la turbina puede generar hasta 100 W con una eficiencia máxima del 85%. El artículo también ofrece recomendaciones para el montaje experimental y el análisis de datos, lo que es crucial para validar el diseño propuesto. Este artículo suministra datos experimentales sobre el rendimiento de la turbina Michell-Banki, lo cual es esencial para validar las simulaciones realizadas mediante CFD(Sierra-Moreno et al., 2024).

4.2 Antecedentes internacionales

- **Numerical analysis and performance enhancement of a cross-flow hydro turbine (2015):** Este estudio tiene como objetivo analizar numéricamente las características y el flujo de fluido en una turbina de flujo cruzado y optimizar su rendimiento utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD). Los autores realizaron simulaciones CFD para evaluar el efecto de diferentes parámetros geométricos como el número de álabes, el ángulo de ataque y la relación de diámetros en el rendimiento de la turbina. Los resultados muestran que la configuración óptima tiene 35 álabes con una eficiencia del 88.4%. Este artículo utiliza CFD para analizar el rendimiento de una turbina de flujo cruzado, lo cual es el enfoque principal del proyecto. Además, evalúa el efecto de parámetros geométricos clave como el número de álabes

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

y la relación de diámetros, que también serán considerados en el proyecto(Acharya et al., 2015).

- **Banki-Michell Optimal Design by Computational Fluid Dynamics Testing and Hydrodynamic Analysis (2013):** En este artículo, se estudian diferentes geometrías de diseño de la turbina, variando parámetros como los ángulos inicial y final de las palas, así como los diámetros del impulsor. Para cada una de estas variaciones, se estudió la eficiencia entregada por la turbina, simulando el comportamiento del flujo con CFD. Para el proyecto que se está desarrollando, es de gran utilidad pues permitirá contrastar los resultados que se obtengan con otros estudios realizados bajo otras condiciones(Sammartano et al., 2013).

5. Metodología

5.1 Geometría y condiciones de operación

Para la realización de la simulación se tuvo en cuenta en primer lugar, la geometría de una turbina Michell Banki propuesta en el estudio "Diseño y análisis de un sistema "pluvio-eléctrico" adaptable a la región del chocó biogeográfico colombiano"(Salvador et al., 2018) considerando para este caso, el inyector y el rodete, así como una zona de salida que funciona como la región por donde el fluido abandona el sistema después de atravesar el rodete y sus respectivos álabes. Esta turbina, opera en un rango de caudal de 5 a 20 LPS, con una altura energética de 6 a 15 metros. Sobre esta, se obtuvo un modelado 3D de la turbina en el programa de diseño asistido por computadora SolidWorks, que posteriormente fue exportado al software de CFD.

Tabla 1

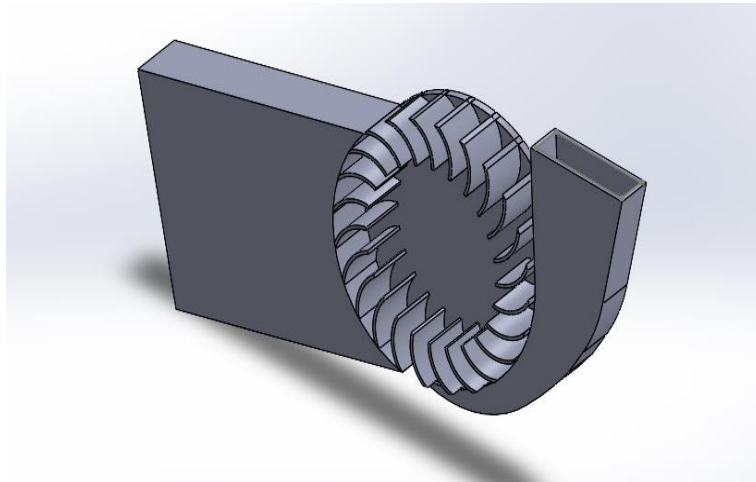
Parámetros geométricos de la turbina

Parámetro	Valor
Diámetro interno (mm)	158
Diámetro externo (mm)	128
Numero de alabes	24
Angulo entre alabes (°)	15
Angulo de ataque de boquilla (°)	11
Ancho del rodete (mm)	18

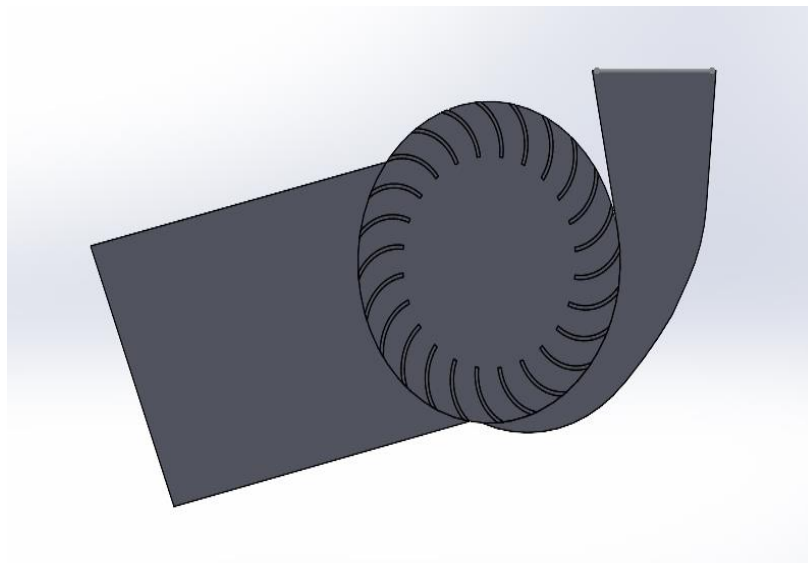
SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 9.

Vista isométrica de la turbina

**Figura 10.**

Vista frontal de la turbina



SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

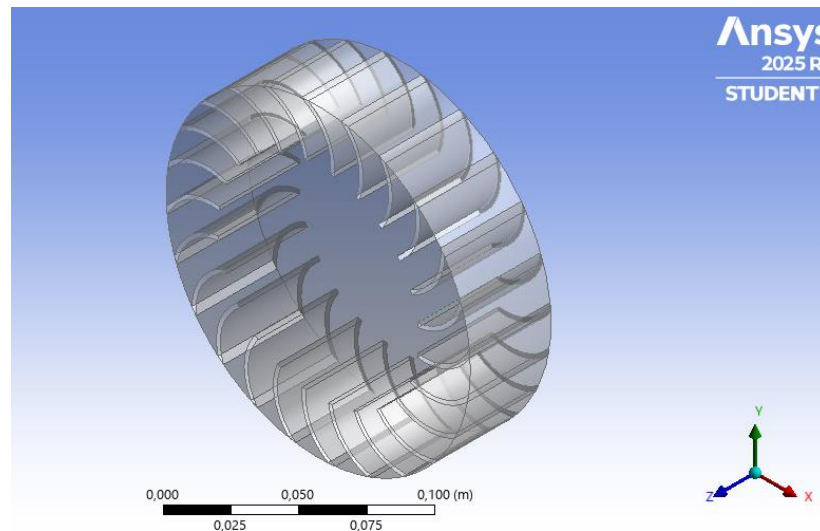
5.2 Dominio computacional

Una vez importada la geometría realizada en SolidWorks, es fundamental, para el correcto desarrollo de la simulación CFD definir el dominio del fluido, es decir, todo el volumen por donde circulara el fluido. Este se realizó utilizando la herramienta Ansys Design modeler y consta de dos partes. La primera de ellas se definió como un dominio completamente estático y corresponde a la zona del inyector, por donde ingresa el fluido a la turbina, así como la zona creada para la salida del mismo. Por otro lado, la segunda parte del dominio, abarca la zona del rodete y los alabes, por lo que en este caso se determinó como un dominio de fluidos rotatorio.

Para ello, se generó un cilindro con el mismo origen del rodete y un radio similar, esto con el objetivo de evitar interferencias con el resto de componentes de la turbina.

Figura 11.

Dominio computacional creado para el rodete de la turbina



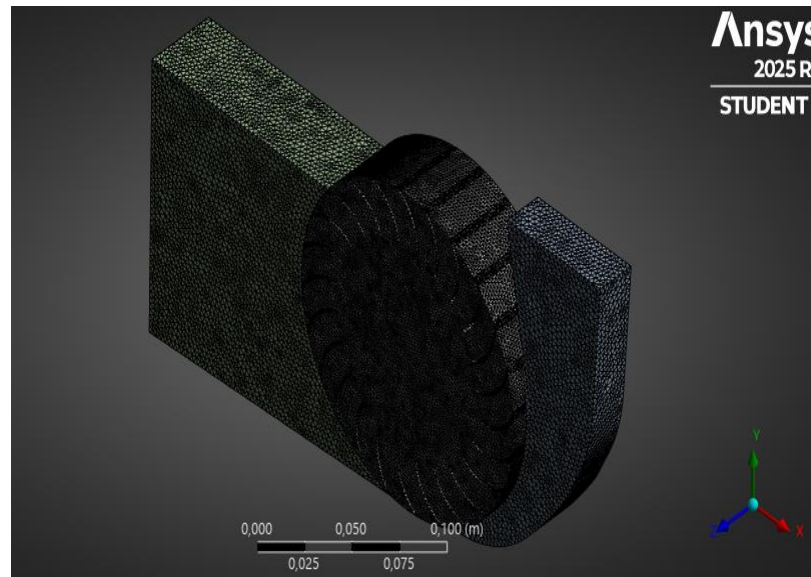
SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

5.3 Mallado del modelo CFD

Para el mallado de la geometría se utilizó Ansys meshing, en donde se implementó una malla no estructural de elementos tetraédricos alrededor de toda la turbina, debido a su gran utilidad en geometrías complejas. Adicionalmente, se realizó un refinamiento en la zona del rodete y los alabes mediante la herramienta “sizing”, buscando una mayor precisión en los resultados obtenidos.

Figura 12.

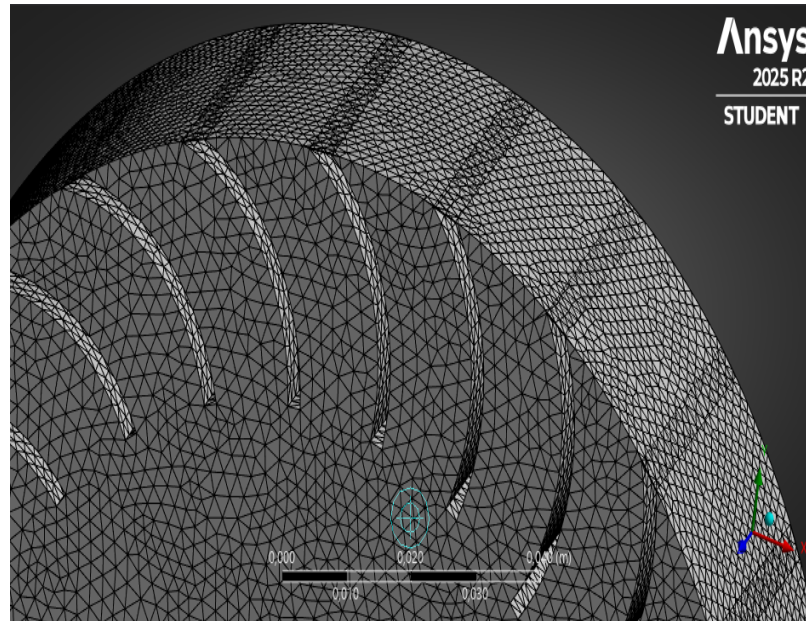
Mallado general de la turbina



SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 13

Vista detallada mallado del rodete

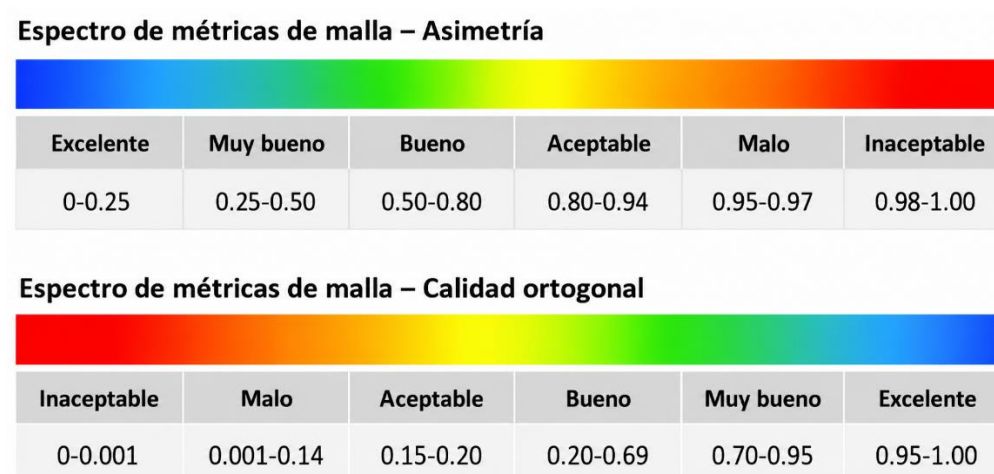


Para evaluar la fiabilidad de este proceso que garantice unos resultados confiables y significativos, se tuvieron en cuenta dos parámetros clave que definen la calidad del mallado: *Skeness* y *Orthogonal Quality*. Los valores recomendados para estos parámetros se muestran en la

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 14

Rango de valores para parámetros de calidad



Nota: Tomado de (Ansys Inc, 2015).

El Skewness o asimetría de malla en Ansys Fluent, es una medida que indica que tan deformada esta una celda con respecto a su forma ideal, es decir, que tan lejos esta un elemento de la malla generada, de ser completamente regular

Por otro lado, la *Orthogonal Quality* o calidad ortogonal, es un indicador de que tan bien esta alineada la malla con respecto a la dirección ideal de los flujos o gradientes correspondientes de cada celda. Es decir, evalúa si la malla en cuestión está bien orientada para poder resolver correctamente las ecuaciones de la simulación.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 15*Orthogonal Quality del mallado realizado*

Details of "Mesh"	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	7,6766e-009
<input type="checkbox"/> Max	0,99695
<input type="checkbox"/> Average	0,76527
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,15079
+ Inflation	
+ Advanced	
- Automatic Methods	
Sheet Body Method	Quad Dominant

Figura 16*Skewness del mallado realizado*

Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3,9214e-009
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,23311
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,15244
+ Inflation	
+ Advanced	
- Automatic Methods	
Sheet Body Method	Quad Dominant
Sweepable Body Method	Sweep
+ Statistics	

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

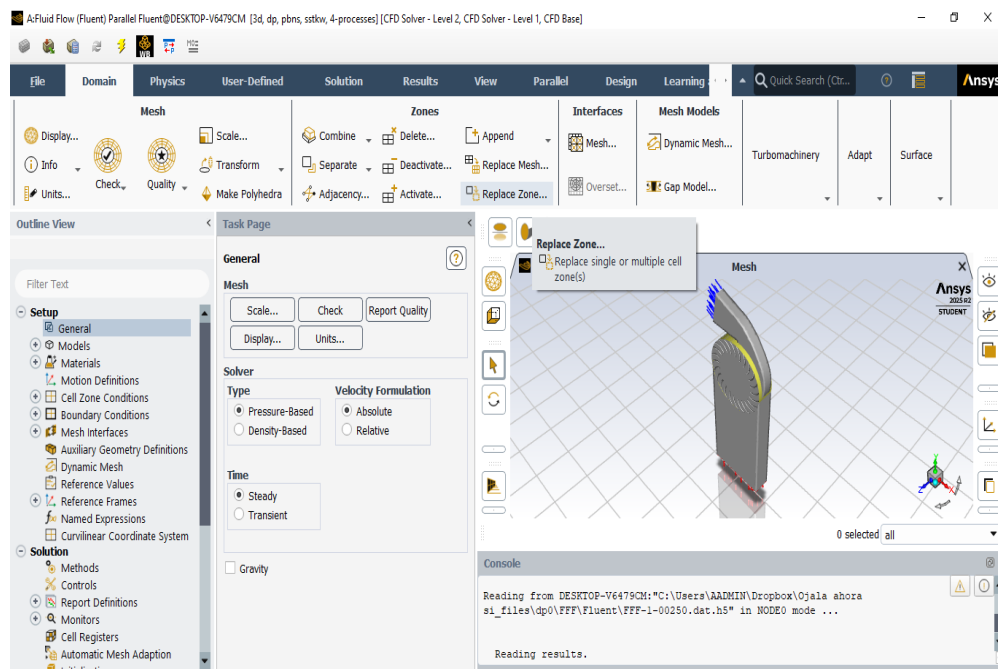
Se obtuvieron unos valores correctos de calidad de malla, teniendo en cuenta el espectro de los parámetros mencionados expuestos en la Figura 13; Considerando además la limitación en el número de elementos que presenta el programa, así como el mayor gasto computacional que implicaría un mayor refinamiento del mallado.

5.4 Set up

En esta etapa se realizó toda la configuración del modelo físico y numérico para llevar a cabo la simulación CFD, definiendo todas las condiciones que determinarían el comportamiento del fluido a lo largo del dominio.

Figura 17

Interfaz set up Ansys



Se establecieron en primer lugar las propiedades del fluido a analizar, tales como la densidad y la viscosidad, así como la velocidad y presión de entrada del mismo, la cual, permite caracterizar el régimen de flujo dentro del sistema. De igual manera, se definieron las condiciones

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

de frontera en las distintas superficies del dominio, así como las interfaces entre las diferentes partes del dominio de la turbina, las cuales permiten una adecuada transferencia de información del flujo entre ambas regiones y representar correctamente la interacción dentro del sistema.

Dentro de esta etapa se definió un caudal de entrada a la turbina de 10 l/s, manejando una presión atmosférica a la entrada del inyector, y una presión de 0 Pa en la región de descarga.

Figura 18

Propiedades del flujo a analizar

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'water-liquid' and the 'Chemical Formula' field contains 'h2o<|>'. The 'Material Type' is set to 'fluid' and the 'Mixture' is set to 'none'. The 'Properties' section shows 'Density [kg/m³]' set to 'constant' with a value of 998.2, and 'Viscosity [kg/(m s)]' set to 'constant' with a value of 0.001003. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. Buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help' are at the bottom.

Se definió además el modelo de turbulencia, que para este caso se eligió el modelo $k - \omega SST$ dado que, a comparación de otros modelos muy comunes, como podría ser el $k - \epsilon$; Permite capturar de manera más confiable fenómenos como la separación de flujo, los fuertes gradientes de presión y los efectos asociados a la rotación, que fundamentales en el comportamiento hidráulico del rodete.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 19

Definición del modelo de turbulencia

Viscous Model

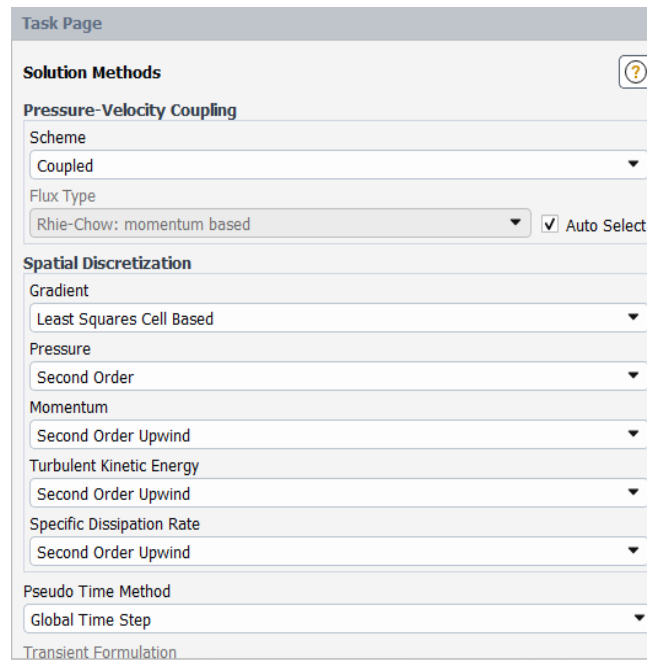
Model	Model Constants
<input type="radio"/> Inviscid <input type="radio"/> Laminar <input type="radio"/> Spalart-Allmaras (1 eqn) <input type="radio"/> k-epsilon (2 eqn) <input checked="" type="radio"/> k-omega (2 eqn) <input type="radio"/> Transition k-k-omega (3 eqn) <input type="radio"/> Transition SST (4 eqn) <input type="radio"/> Reynolds Stress (7 eqn) <input type="radio"/> Scale-Adaptive Simulation (SAS) <input type="radio"/> Detached Eddy Simulation (DES) <input type="radio"/> Large Eddy Simulation (LES)	Alpha*_inf <input type="text" value="1"/> Alpha_inf <input type="text" value="0.52"/> Beta*_inf <input type="text" value="0.09"/> a1 <input type="text" value="0.31"/> Beta_i (Inner) <input type="text" value="0.075"/> Beta_i (Outer) <input type="text" value="0.0828"/> TKE (Inner) Prandtl # <input type="text" value="1.176"/> TKE (Outer) Prandtl # <input type="text" value="1"/> SDR (Inner) Prandtl # <input type="text" value="2"/> SDR (Outer) Prandtl # <input type="text" value="1.168"/> Production Limiter Clip Factor <input type="text" value="10"/>
k-omega Model <input type="radio"/> Standard <input type="radio"/> GEKO <input type="radio"/> BSL <input checked="" type="radio"/> SST <input type="radio"/> WJ-BSL-EARSM	
k-omega Options <input type="checkbox"/> Low-Re Corrections	
Near-Wall Treatment <input type="text" value="correlation"/>	

Posteriormente, se configuraron parámetros numéricos del modelo, incluyendo los esquemas de discretización, el algoritmo de acoplamiento entre presión y velocidad, y los criterios de convergencia.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 20

Parámetros numéricos del modelo



The image shows a screenshot of a software interface titled "Task Page". It contains several sections for configuring numerical parameters:

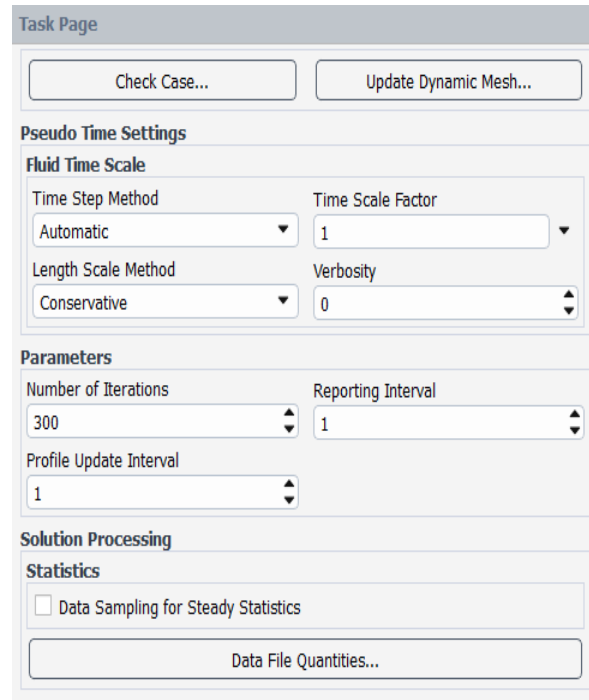
- Solution Methods**: Includes a help icon (question mark in a circle).
- Pressure-Velocity Coupling**:
 - Scheme**: A dropdown menu set to "Coupled".
 - Flux Type**: A dropdown menu set to "Rhie-Chow: momentum based" with a checked "Auto Select" checkbox.
- Spatial Discretization**:
 - Gradient**: A dropdown menu set to "Least Squares Cell Based".
 - Pressure**: A dropdown menu set to "Second Order".
 - Momentum**: A dropdown menu set to "Second Order Upwind".
 - Turbulent Kinetic Energy**: A dropdown menu set to "Second Order Upwind".
 - Specific Dissipation Rate**: A dropdown menu set to "Second Order Upwind".
- Pseudo Time Method**: A dropdown menu set to "Global Time Step".
- Transient Formulation**: A label at the bottom of the section.

Finalmente, se definió para la ejecución de la simulación un total de 300 iteraciones, con el objetivo de permitir la estabilización de las diferentes variables de flujo inherentes al proceso y alcanzar la convergencia de los residuos en la resolución de las ecuaciones.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 21

Configuración del proceso iterativo

**5.5 Modelado y simulación**

Se realizaron las simulaciones numéricas de la turbina, en las que se varió la velocidad de rotación del rodete utilizando la herramienta de Ansys “*Frame motion*“, y manteniendo un caudal de 10 L/s. Con el objetivo de analizar la influencia de la velocidad angular del rodete en el comportamiento hidráulico de la turbina.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 22

Opción *Frame motion*

The screenshot shows the 'Frame Motion' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Zone Name' is 'rotatorio' and the 'Material Name' is 'water-liquid'. The 'Frame Motion' checkbox is checked. The 'Reference Frame' tab is selected, showing 'Relative Specification' with 'Relative To Cell Zone' set to 'absolute' and 'UDF' with 'Zone Motion Function' set to 'none'. The 'Rotation-Axis Origin' is set to (0, 0, 0) and the 'Rotation-Axis Direction' is set to (0, 0, 1). The 'Rotational Velocity' is set to 500 rev/min. The 'Translational Velocity' is set to (0, 0, 0) m/s. There are 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons at the bottom.

5.6 Validación de la simulación

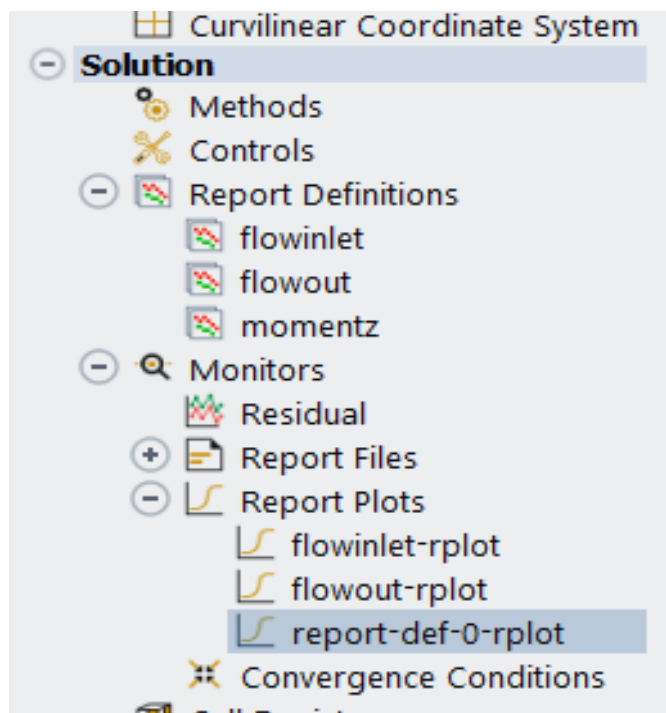
La validación del modelo numérico se llevó a cabo mediante la verificación de criterios de convergencia, conservación de masa y comparación con información reportada en la literatura. En primer lugar, se realizó el monitoreo de los residuales durante el proceso iterativo con el fin de evaluar la estabilidad y la convergencia de la solución. De manera complementaria, se evaluó el flujo másico en las superficies de entrada y salida del dominio, verificando el cumplimiento del principio de continuidad.

Para realizar este seguimiento, se utilizó la herramienta del set up de Ansys Fluent “*Reports definitions*” y “*Report plots*”, las cuales permiten observar gráficamente, así como numéricamente, las variables que se quiera monitorear en cada una de las iteraciones.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 23

Herramientas para el monitoreo de variables



Adicionalmente, se realizó la comparación del comportamiento de variables de desempeño, como la eficiencia, con resultados experimentales reportados para turbinas del mismo tipo, con el objetivo de analizar la coherencia en las tendencias obtenidas. Este conjunto de criterios permitió establecer una base adecuada para la validación del modelo y la confiabilidad de la simulación.

5.7 Convergencia de malla

La convergencia de malla se evaluó mediante el análisis del torque obtenido en la simulación, estableciendo diferentes niveles de refinamiento de la malla. Para ello, se compararon los valores de torque calculados en cada caso, con el fin de identificar el punto a partir del cual con el refinamiento de la malla no genera variaciones significativas en este parámetro estudiado. Este procedimiento permitió verificar que los resultados son independientes de la discretización

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

empleada, garantizando así la estabilidad y confiabilidad de la solución numérica, sin la necesidad de aumentar el costo computacional de la simulación numérica.

5.8 Determinación del potencial eléctrico de la turbina

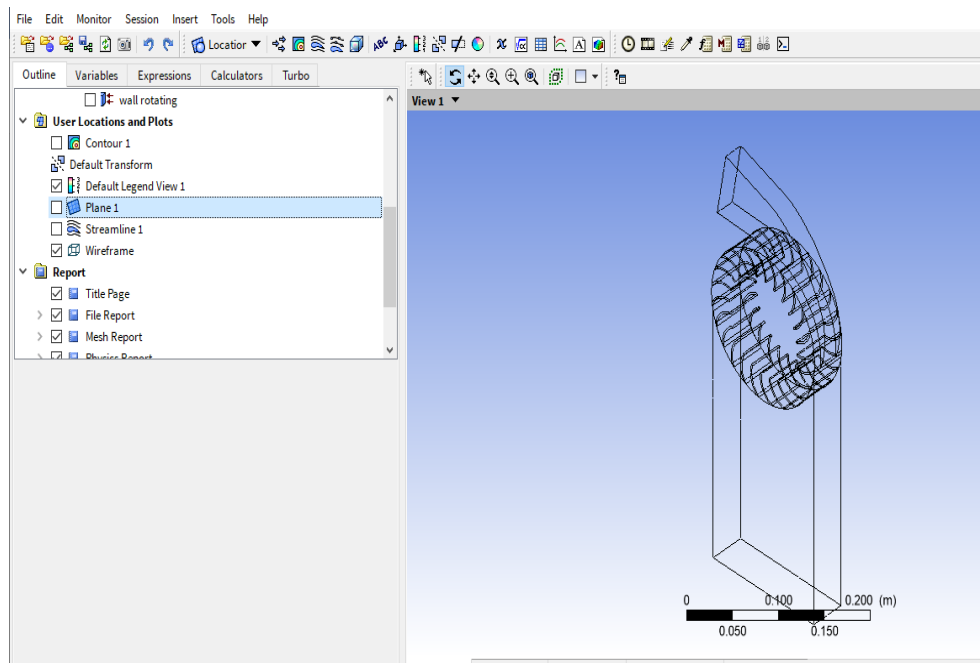
Se determinó la potencia eléctrica de la turbina a partir de los resultados obtenidos en la simulación numérica. Para ello, se tuvo en cuenta el torque generado sobre el rodete, junto con la velocidad angular de operación, permitiendo estimar la potencia mecánica del sistema mediante cálculos teóricos propios de las turbomáquinas. Asimismo, se consideraron las condiciones hidráulicas de operación, tales como el caudal y la altura, con el fin de calcular la potencia disponible del flujo y establecer una comparación con la potencia generada. Este análisis permitió no solo evaluar el desempeño energético de la turbina, sino también estimar su capacidad de suministro eléctrico, con el propósito de analizar su viabilidad en proyectos de ingeniería orientados a proveer energía eléctrica a zonas o locaciones que no cuenten con este recurso.

5.9 Postprocesamiento

El análisis del comportamiento del flujo se llevó a cabo mediante el postprocesamiento de los resultados obtenidos en la simulación numérica. Para ello, se utilizaron herramientas gráficas como contornos de variables (velocidad y presión) y las líneas de corriente de flujo, las cuales permitieron evaluar la distribución del flujo dentro del dominio computacional y su interacción con el rodete y los alabes. A partir de estas representaciones, fue posible identificar patrones de flujo, zonas de aceleración, gradientes de presión y la presencia de recirculaciones

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 24

Interfaz results de Ansys

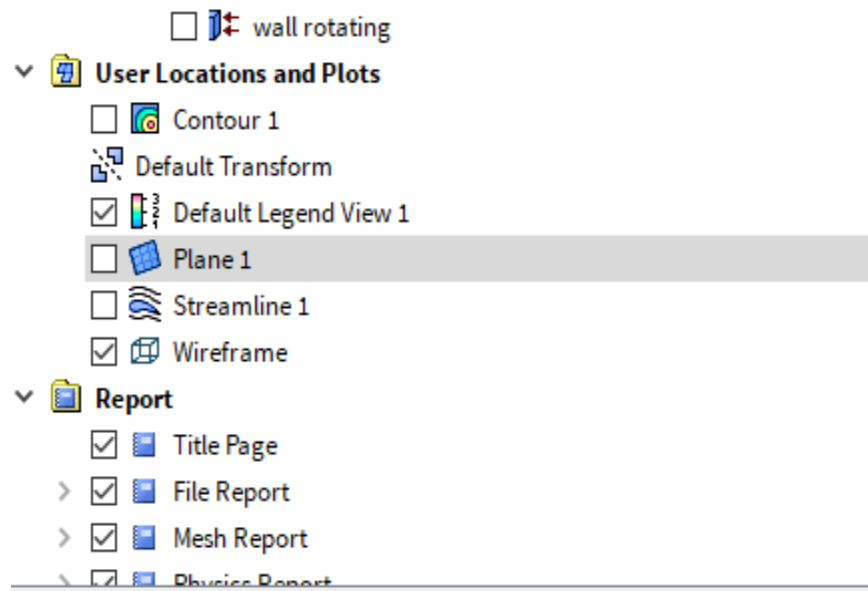
Para lograr esto, dentro de la sección de *results* de Ansys fluent, se hizo uso de las herramientas *contour*, la cual representa gráficamente por medio de una escala de colores los valores de las variables que se requieran en cada una de las zonas de la geometría, y *streamline* que ilustra la trayectoria que toma el fluido a lo largo del dominio, así como la velocidad de las mismas.

Para ambas herramientas, se ubicó un plano transversal a la geometría, ubicado en la mitad de la misma.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 25

Herramientas utilizadas para el postprocesamiento



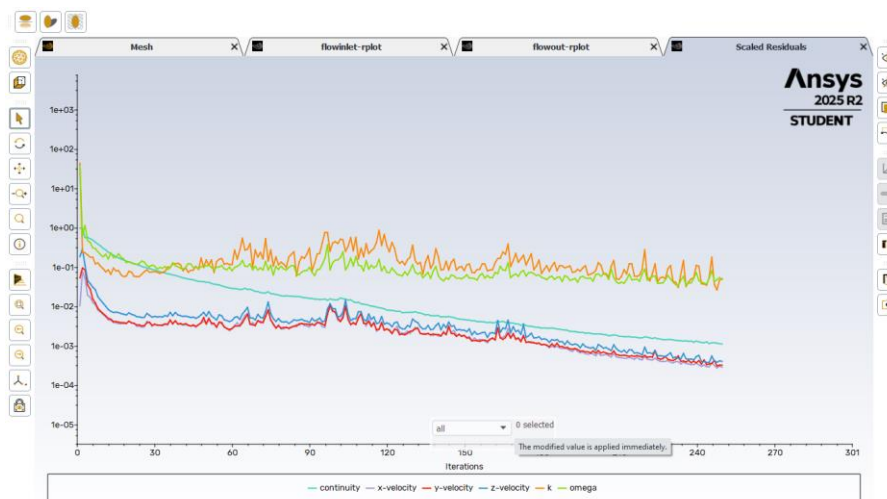
6. Resultados

6.1 Validación del modelo CFD

Se monitorearon en primer lugar algunas variables clave durante el proceso iterativo, tales como la convergencia de los residuales, el flujo masico de entrada y a la salida de la geometría, con el objetivo de verificar la estabilidad y convergencia de la solución.

Figura 26

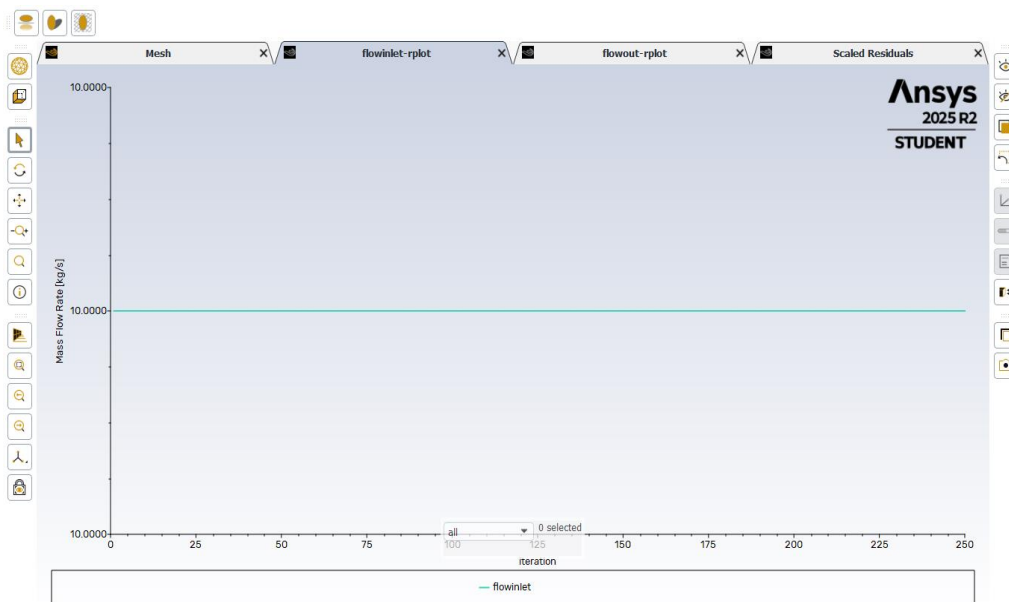
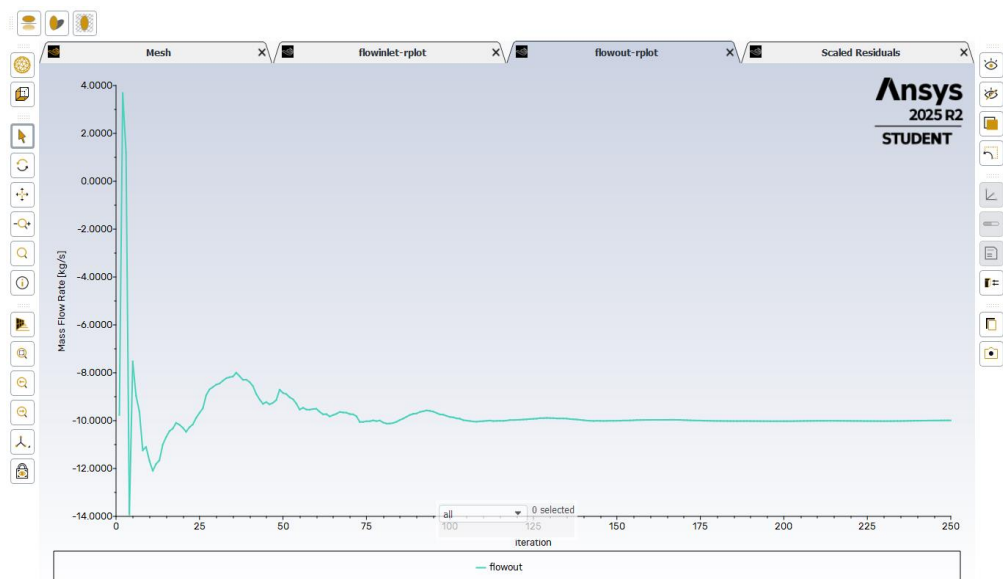
Residuales del modelo CFD



Los valores residuales en una simulación CFD se definen como el desbalance resultante en las ecuaciones que el software resuelve durante el proceso de simulación, es por ello que se busca que este variable se mantenga en valores considerablemente bajos, de manera que el comportamiento y los resultados que se obtengan sean fieles a la realidad.

Como se observa en la **Figura 21**, los valores de residuales se mantienen alrededor de los 10^{-3} , lo cual se encuentra dentro de un rango adecuado según los criterios de convergencia establecidos por Ansys por defecto (Ansys Inc, 2015).

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 27*Flujo másico de entrada***Figura 28***Flujo másico a la salida*

Como se evidencia en **Figura 22 y 23** el flujo másico de turbina se mantuvo sobre los 10 litros por segundo durante el proceso iterativo, cumpliendo con el principio de conservación de

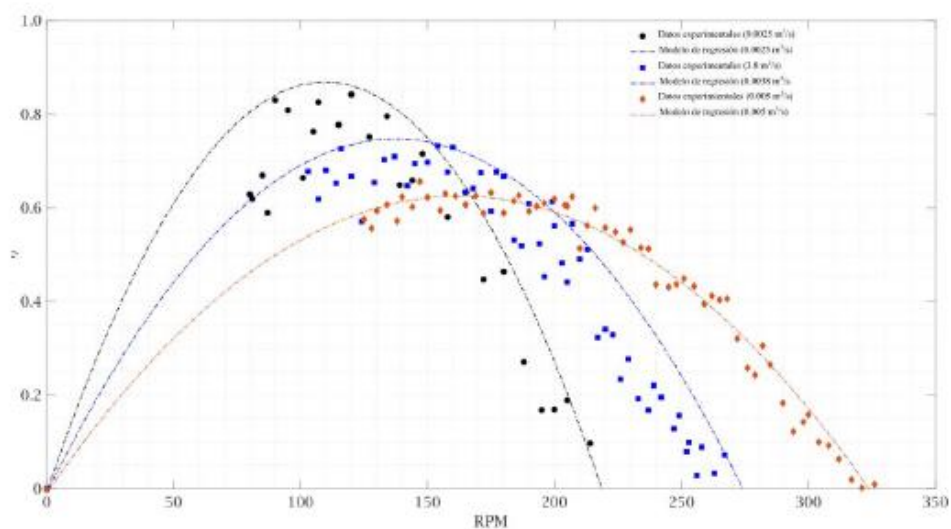
SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

masa dentro de la simulación, lo cual constituye un indicador adicional de la correcta configuración del modelo y de la validez de los resultados obtenidos.

Por otro lado, se evaluó el comportamiento de la eficiencia de la turbina bajo diferentes velocidades de rotación del rodete y se compararon con los resultados experimentales reportados por Sierra-Moreno, et al. (2024) en donde se estudia una turbina de flujo cruzado bajo diferentes condiciones de operación.

Figura 29

Resultados experimentales reportados por autores

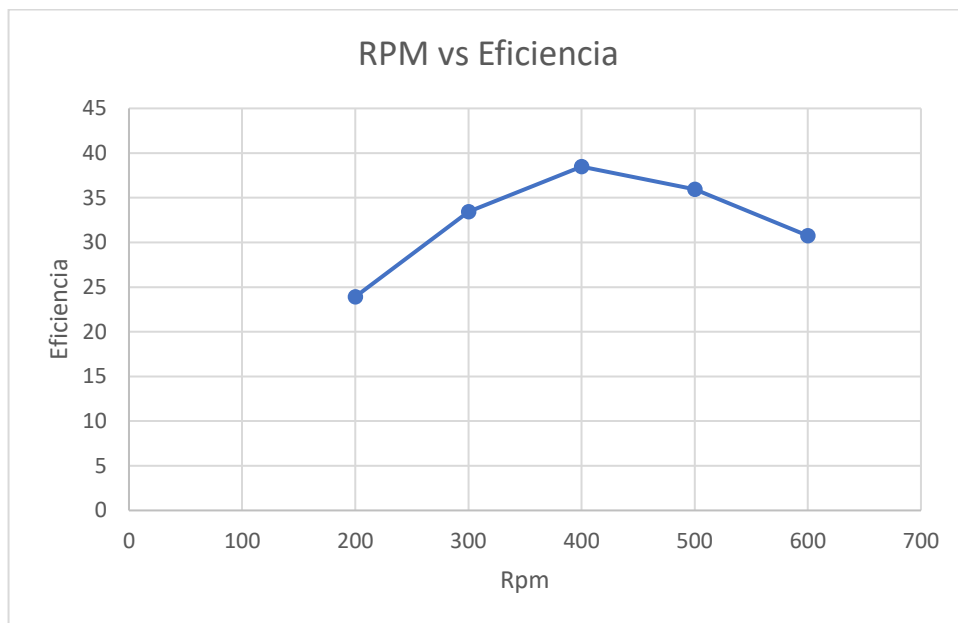


Nota: Tomado de Sierra-Moreno, D., Romero-Menco, F., Velásquez-García, L. I., Rubio-Clemente, A., & Chica, E. (2024). Recomendaciones para la realización y análisis de pruebas experimentales en turbinas hidráulicas tipo Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 23(2).

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 30

Grafica RPM vs Eficiencia obtenida de la simulación



Como se observa en la gráfica, las dos graficas pese a no mostrar resultados numéricamente iguales, pues corresponden a dos geometrías distintas, presentan una tendencia similar en el valor de la eficiencia, en donde se alcanza un punto máximo de rendimiento para luego disminuir paulatinamente. Lo cual, evidencia la capacidad del modelo simulado para reflejar el comportamiento de este tipo de turbinas.

6.2 Convergencia de malla

La convergencia de malla se evaluó mediante el análisis del torque obtenido para diferentes niveles de refinamiento.

Tabla 2*Resultado convergencia de malla*

Número de elementos	Torque (N-m)
124425	9,8
270363	11,2
477818	12,1
754829	13,01
907854	13,32
1039122	13,51

Los resultados evidencian un incremento progresivo del torque a medida que se aumenta el número de elementos, mostrando la influencia del mallado en los resultados obtenidos. No obstante, en las últimas dos discretizaciones, se observa una tendencia en la que se alcanza un valor límite. Este comportamiento indica que la solución ha alcanzado una adecuada independencia de malla, permitiendo considerar los resultados como confiables sin incurrir en un costo computacional significativamente mayor.

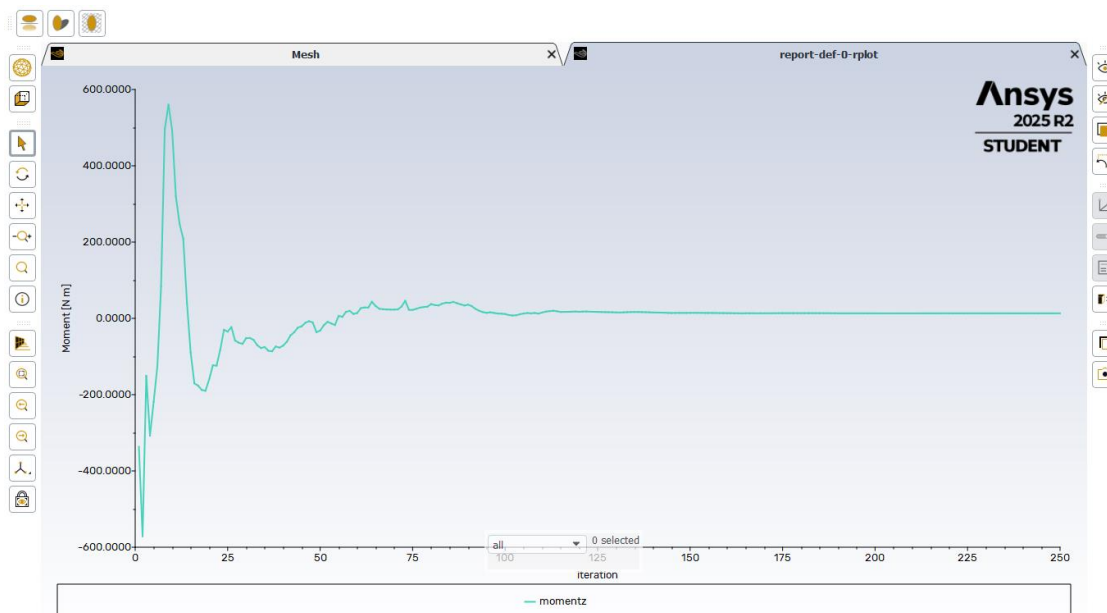
6.3 Potencia eléctrica de la turbina

Se determino la potencia y eficiencia de la turbina a partir de los datos obtenidos en la simulación CFD, mediante variables como la velocidad del fluido, el torque generado y la velocidad de rotación del sistema.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 31

Grafica comportamiento del torque



Para contrastar estos datos, se desarrolló el cálculo teórico de la potencia generada por la turbina en las relaciones analíticas del comportamiento del flujo en el rodete.

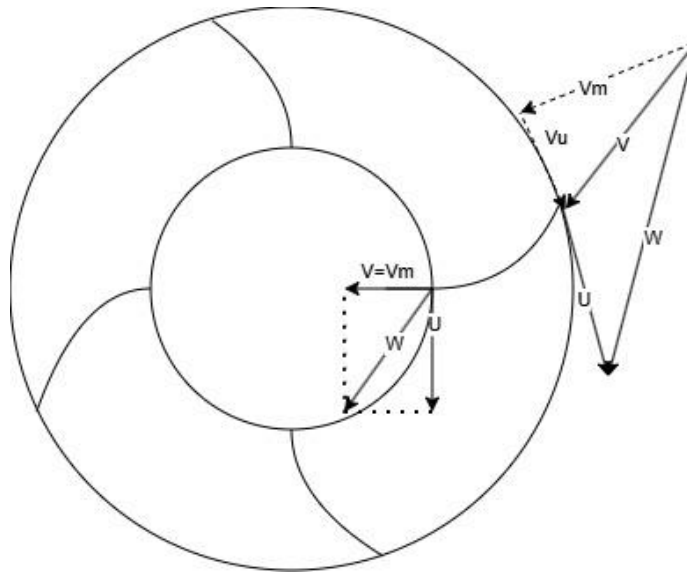
Para ello, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros del sistema:

Tabla 3

Parámetros iniciales de la turbina

Caudal de entrada	$0,01 \text{ m}^3/\text{s}$
Area de entrada del inyector	$1,597 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Angulo de entrada	12°
Velocidad de rotación del rodete	400 rpm

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 32*Triangulo de velocidades del rodete*

Se calcula la velocidad absoluta de entrada:

$$V_1 = \sqrt{2 * 9,81 * 15} \quad [10]$$

$$V_1 = 17,55 \text{ m/s}$$

Teniendo en cuenta la velocidad de rotación del rodete, se calcula la velocidad periférica a la entrada:

$$U = \frac{\pi * D * N}{60} \quad [11]$$

$$U = \frac{\pi * 0,158 * 400}{60}$$

$$U = 3,30 \text{ m/s}$$

Se descomponen las componentes de la velocidad absoluta, se calcula por un lado la velocidad tangencial, a la entrada del rodete:

[12]

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

$$V_{u1} = V_1 * \cos (12^\circ)$$

$$V_{u1} = 17,166 \text{ m/s}$$

Se calcula por otro lado la velocidad radial:

$$V_{r1} = V_1 * \text{sen} (12^\circ) \quad [13]$$

$$V_{r1} = 3,64 \text{ m/s}$$

Se procede a calcular los componentes de la velocidad relativa del sistema:

$$W_{u1} = V_{u1} - U \quad [14]$$

Reemplazando:

$$W_{u1} = 17,166 - 3,3$$

$$W_{u1} = 13,866 \text{ m/s}$$

$$W_{r1} = V_{r1} = 3,64 \text{ m/s}$$

Calculando su magnitud:

$$W = \sqrt{(W_{u1})^2 + (W_{r1})^2} \quad [15]$$

$$W = \sqrt{(13,866)^2 + (3,64)^2}$$

$$W = 14,33 \text{ m/s}$$

Asumiendo el caso ideal en el que toda la velocidad se desarrolla de manera tangencial, se calcula la potencia del sistema, utilizando las ecuaciones de Euler que se definen de la siguiente manera:

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

$$P = m * (U_1 * V_{u1})$$

$$P = 0.01 * 1000 * (17,166 * 3,3)$$

$$P = 555,6 W$$

Una vez obtenido el resultado de la potencia, se repitió este mismo proceso utilizando diferentes velocidades angulares, con el objetivo de compararlas con los datos numéricos arrojados por la simulación para estas mismas condiciones.

Para realizar esta comparación se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{Valor experimental} - \text{Valor teórico}}{\text{Valor teórico}} * 100 \quad [17]$$

Donde:

Valor experimental = Valor obtenido por los resultados numéricos de la simulación

Valor teórico = Valor calculado manualmente según las condiciones teóricas iniciales

Tabla 4

Comparación datos experimentales de la simulación con datos teóricos

Velocidad angular (RPM)	Potencia teórica	Potencia experimental	% de error
200	300,91	277,8	-8,32
300	438,48	416,7	-5,23
400	566,478	565,7	-1,96

Como se observa en la **Tabla 4**, los valores obtenidos de la simulación son ligeramente menores a los calculados de manera teórica. Esto se explica a que en la simulación por CFD a

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

diferencia del modelo ideal calculado manualmente, toma en cuenta algunos fenómenos físicos propios de este tipo de turbomáquinas como podrían ser las pérdidas por fricción, efectos viscosos o posibles recirculaciones del flujo durante su paso por la turbina. Lo cual, reduce la cantidad de energía transferida al rodete.

No obstante, realizando la comparación entre ambos valores, se evidencia que el porcentaje de error siendo inferior al 10% no es resultado considerablemente alto; Lo que refleja que el modelo numérico y geométrico utilizado en la simulación captura de manera adecuada el comportamiento físico del sistema, validando así la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Para el cálculo de la eficiencia de la turbina, se tuvo en cuenta la siguiente ecuación propia de las turbomáquinas:

$$\eta = \frac{Pot_{mec}}{Pot_{hid}} \quad [18]$$

Y definiendo la potencia hidráulica como:

$$Pot_{hid} = \rho * Q * H * g \quad [19]$$

$$Pot_{hid} = 1000 * 0,01 * 15 * 9,81$$

$$Pot_{hid} = 1468 \text{ w}$$

Una vez calculada la potencia hidráulica, se calcula la eficiencia de la turbina:

$$\eta = \frac{566,478}{1471}$$

$$\eta = 0,385 = 38,4\%$$

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Se evidencio en la Tabla 3 que la turbina en cuestión, tiene la capacidad generar aproximadamente entre 500 y 600 W de potencia, que mostrando una eficiencia de apropiadamente el 38,4%, equivale a 218W.

Teniendo este dato en cuenta, se calcula potencial eléctrico que puede brindar a la turbina a lo largo de un año natural, con el fin de evaluar su viabilidad en futuros proyectos de ingeniería, para ello, utilizando el resultado obtenido de potencia, se calculó la energía de la turbina:

$$E = P * t \quad [20]$$

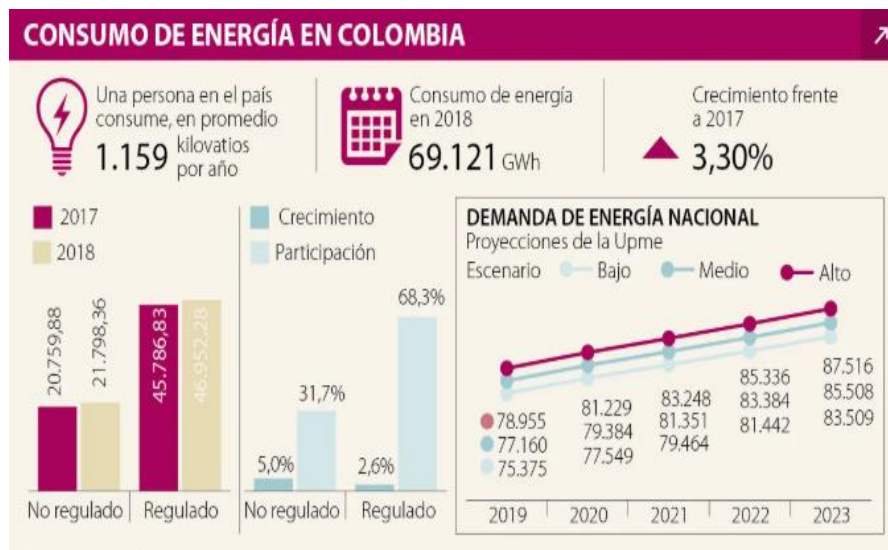
Entendiendo que un año natural contiene un total de 8760 horas:

$$E = 0,218Kw * 8780 \text{ horas}$$

$$E = 1914 \text{ Kwh}$$

Figura 33

Consumo de energía eléctrica en Colombia



Nota: Tomado de Diario La República

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Teniendo en cuenta este resultado, la producción energética de la turbina podría abastecer un hogar de hasta dos habitantes, lo que podría constituir según el promedio de personas de los hogares en Colombia hasta dos viviendas dependiendo de sus niveles de demanda, que no cuenten con acceso al servicio eléctrico y dispongan del recurso hídrico necesario para su operación.

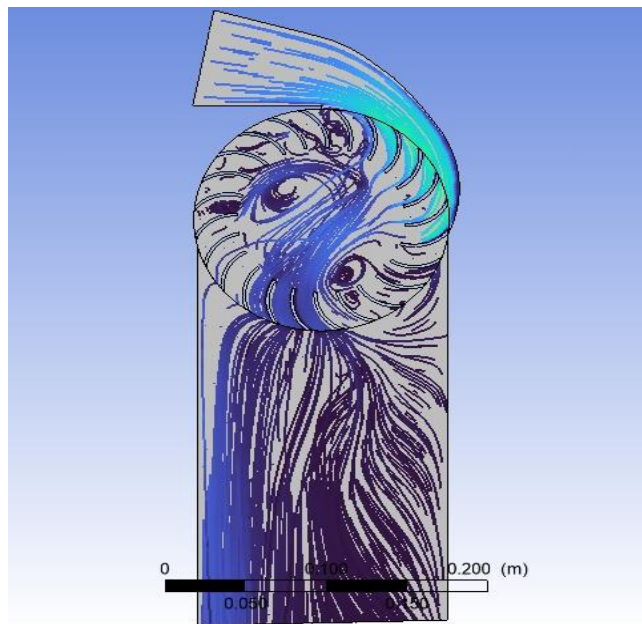
6.4 Postprocesamiento de la simulación

6.4.1 Estructura y corrientes de flujo

Se realizó en primer lugar el análisis de las líneas de corriente, con el objetivo de visualizar la trayectoria que presentaba el fluido a lo largo de todo el dominio computacional, así como una interacción con el rodete y los alabes.

Figura 34

Líneas de corriente desarrolladas durante la simulación



Las líneas de corriente presentadas en la **Figura 28**, evidencian como el flujo entra de manera uniforme al inyector y se desarrolla de la misma manera hasta llegar al rodete, en donde al

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

entrar en contacto con los alabes experimenta un cambio progresivo en su dirección, siguiendo en gran medida la geometría del rodete, lo que refleja una adecuada transferencia de la cantidad de movimiento.

De igual manera, se observa a medida que el flujo avanza dentro del rodete la presencia de posibles recirculaciones y algunas trayectorias menos organizadas, que pueden atribuirse a efectos de separación del flujo, cambios bruscos de dirección o posibles desajustes entre la velocidad de rotación del rodete y la velocidad del flujo. Este tipo de fenómenos es común en turbinas de flujo cruzado y suele estar asociado a la complejidad del comportamiento del fluido en este tipo de configuraciones.

Pese a esto, el comportamiento global de las líneas de flujo es coherente con lo esperado para este tipo de turbinas y refleja adecuadamente su comportamiento general.

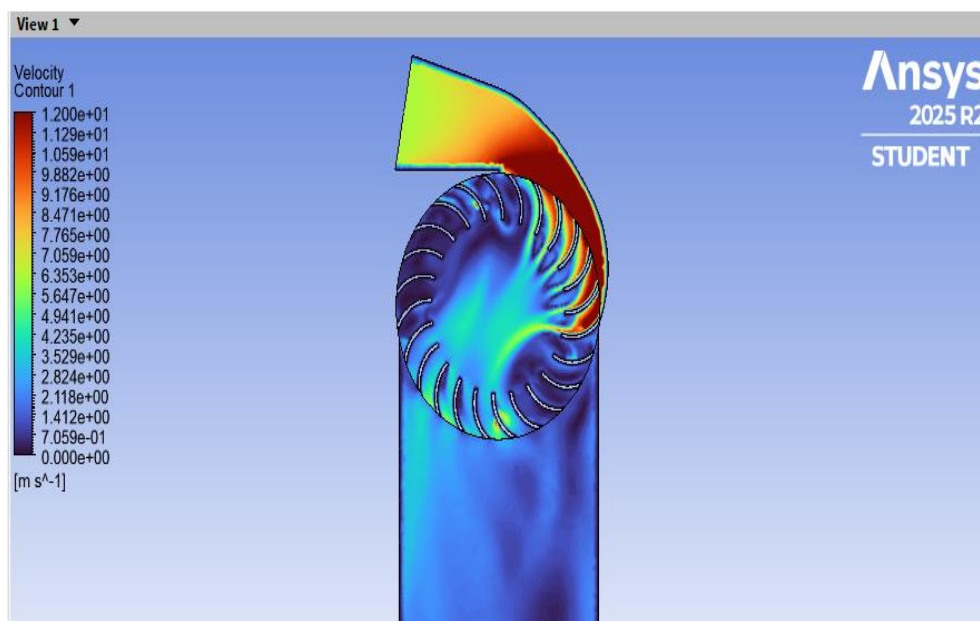
6.4.2 Contornos de velocidad y presión

A partir de las simulaciones realizadas, se realizó el análisis de los contornos de la velocidad, con el objetivo de evaluar la distribución del campo de velocidades dentro del dominio y su interacción con el rodete, permitiendo identificar las zonas de mayor y menor velocidad, así como analizar el proceso de transferencia de energía del fluido hacia la turbina y su comportamiento a lo largo del sistema.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Figura 35

Campo de velocidad dado por la simulación



Se evidencia un comportamiento consistente con el esperado en este tipo de turbinas. Registrando las mayores velocidades, cercanas a los 18m /s, en la zona del inyector, donde el fluido se acelera previo a su ingreso al rodete, aumentando así la energía cinética disponible para su posterior aprovechamiento.

Una vez el fluido entra en contacto con el rodete y los alabes, se observa como mantiene unas altas velocidades en la zona periférica del rodete, por lo que se garantiza una interacción efectiva entre la corriente de flujo entre y la geometría de los alabes, favoreciendo de esta manera la transferencia de energía. A medida que el fluido se desarrolla al interior del rodete, se aprecia una disminución progresiva de la velocidad, alcanzando valores entre los 6 y 10m/s, causada en gran parte por la cesión de energía del fluido hacia el rodete. No obstante, esta disminución no se desarrolla de manera uniforme, pues se pueden identificar regiones con variaciones locales de la velocidad, que pueden estar asociadas entre otras cosas a la complejidad del flujo, la curvatura de

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

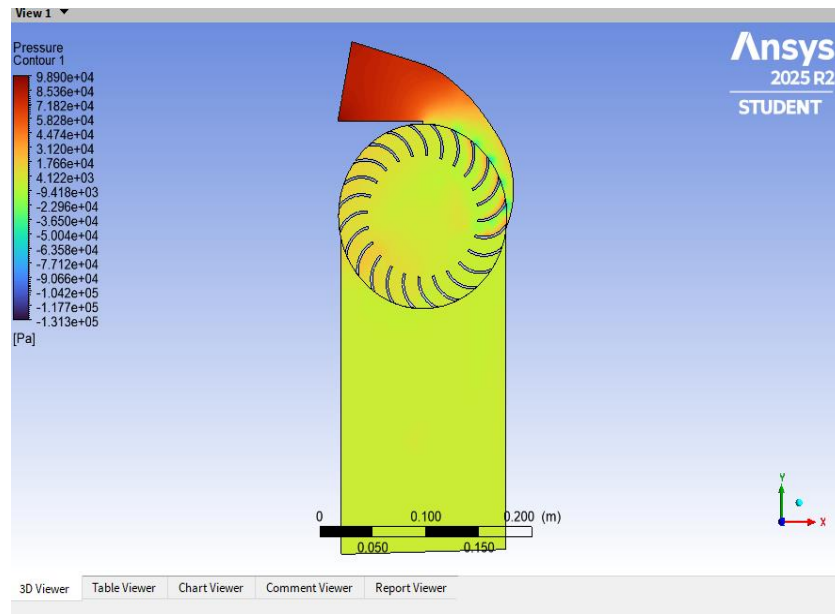
los alabes o la presencia de posibles recirculaciones. Indicando así, la existencia de pérdidas hidráulicas inherentes a este tipo de procesos.

Ya en la región de salida, predominan velocidades más bajas, en un rango de 0 y 3 m/s, debido a que gran parte de la energía cinética ha sido transferida al rodete, que si bien, no es completamente homogénea, sugiriendo que aún existe energía residual en fluido, refleja de manera adecuada el comportamiento general de este tipo de turbinas.

A continuación, se presenta el contorno de presión obtenido a partir de las simulaciones numéricas, el cual permite analizar la distribución de presión a lo largo del dominio, y sus respectivas variaciones en cada una de las zonas del mismo, además de permitir identificar las zonas de mayor y menor presión, así como los gradientes presentes en el sistema y su relación con la generación de trabajo mecánico en la turbina.

Figura 36

Contorno de presión dado por la simulación numérica



SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

En la región del inyector se presentan los valores más altos de presión cercanos a los $9,9 \times 10^5 \text{ Pa}$, lo que es coherente dada la entrada del fluido al inyector previa a su aceleración, en donde la energía del fluido predomina en forma de presión. A medida que la corriente de flujo se desarrolla a lo largo del inyector y se aproxima al rodete, va disminuyendo sus valores de presión, indicando la conversión de esta en energía cinética.

Una vez el fluido entra en contacto con el rodete, se aprecia un gradiente de presión mucho más marcado, más específicamente en la zona en la que la corriente de flujo impacta con la geometría de los alabes. Esto se explica por la transferencia de energía efectiva hacia el rodete. Esta diferencia de presiones es fundamental en el funcionamiento de este tipo de turbinas pues es responsable de la generación de torque mecánico y por ende de la potencia generada por la turbomáquina.

Al interior del rodete, se observa una homogenización de los valores de presión, eso sí, con ligeras variaciones asociadas a la dinámica del flujo y la geometría de los alabes. Finalmente, en la región de descarga de la turbina se observan de presión mucho más bajos, lo cual, obedece a la pérdida de energía de fluido tras su paso por el rodete.

7. Conclusiones

- Se definió para la simulación numérica como condiciones iniciales de operación, un caudal constante de 10 L/s y una altura hidráulica de 15 m, con el fin de establecer un escenario representativo de una nano central para el análisis del sistema. Teniendo esto en cuenta, y tomando como referencia la geometría adaptada de un trabajo de grado, así como el dimensionamiento previamente establecido y expuesto en la Tabla 1. Se construyó un dominio computacional mediante el uso de Ansys Design Modeler, el cual, permitió definir el volumen de fluido con el que se llevaría a cabo la simulación; Para ello, se consideraron aspectos fundamentales para la correcta configuración del modelo, tales como la definición de las condiciones de frontera, o la necesidad de implementar mediante la generación de un cilindro de 0,079 m de radio (mismo que el rodete) un dominio rotatorio para la geometría del rodete, que permitiera simular el comportamiento rotacional de este.

- A partir de la evaluación de parámetros de calidad de malla como la *Orthogonal Quality* y el *Skewness*, así como en los rangos recomendados para estos indicadores, se obtuvo una alta calidad en el mallado con valores respectivamente de 0,76 y 0,23, lo que es fundamental para garantizar la confiabilidad de los resultados arrojados por la simulación. Todo ello teniendo en cuenta algunas limitaciones importantes durante el proceso, como el número de elementos de la malla permitidos por la versión del software en la que se trabajó, o el costo computacional que requeriría una discretización más precisa.

- Teniendo en cuenta los datos obtenidos, la turbina presenta, bajo una velocidad rotacional de 400 rpm, punto donde alcanza su máximo rendimiento, una

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

potencia eléctrica de entre los 500 y 600 W de potencia, con una eficiencia de apropiadamente el 39%, se traduce en 218 W de potencia eléctrica, que, proyectándolo a lo largo de un año natural, podrían significar hasta 1914 KWh. Comparando este resultado con el consumo promedio de energía eléctrica por habitante en Colombia, se evidencia como este tipo de turbina tiene la capacidad para abastecer, dependiendo de la demanda específica, las necesidades básicas de hasta dos hogares, convirtiéndola en una alternativa viable para aquellas zonas u locaciones que se encuentran privadas de este recurso eléctrico, sin requerir una alta inversión económica para su implementación, ni un gran caudal de agua para su operación.

- La validación del modelo numérico se llevó a cabo considerando diferentes factores. En primer lugar, se monitoreó el comportamiento de la convergencia de residuales de la simulación, los cuales, durante el proceso iterativo se estabilizaron alrededor de 10^{-3} , lo que corresponde según los criterios de convergencia de Ansys a un rango de valores para esta variable. Asimismo, se verificó la conservación del flujo másico a lo largo del dominio, manteniéndose en los 10 L/s establecidos previamente en las condiciones iniciales de operación. Adicionalmente, se realizó la comparación del comportamiento de la eficiencia de la turbina, con datos reportados en la literatura, en la que se encontró una tendencia similar a pesar de las diferencias geométricas en ambos estudios.

- A partir de los contornos de velocidad arrojados por la simulación, se observa una aceleración significativa del flujo en el inyector, donde se alcanzaron las mayores velocidades registradas, cercanas a los 18,4 m/s. Valor que empieza a disminuir progresivamente a medida que el fluido interactúa con el rodete, hasta

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

alcanzar unos valores de velocidad de entre 6 a 10 m/s, lo que refleja la adecuada transferencia de energía del fluido al sistema mecánico. Por otro lado, en la región de salida se registran velocidades mucho más bajas en un rango de 0 a 3 m/s, asociadas a posibles recirculaciones locales de la geometría y la disipación de energía. En conjunto, los valores obtenidos de velocidad a lo largo del sistema, así como la distribución cualitativa del mismo, responden de manera consistente y validan la coherencia de la simulación, teniendo en cuenta las condiciones de operación establecidas.

- Del análisis de los contornos de presión obtenidos de la simulación numérica, se observan presiones máximas en la zona del inyector de $9,9 \times 10^4$ Pa, donde el fluido aun conserva gran parte de su energía de presión. No obstante, a medida que el flujo avanza e interactúa con el rodete, se registra una disminución considerable de la presión, alcanzando valores cercanos a los $-1,3 \times 10^5$ Pa, confirmando la conversión de energía de presión en energía cinética y mecánica, además de posibles recirculaciones inherentes al sistema. Este marcado gradiente de presión, es característico en el funcionamiento de este tipo de turbinas, y es consistente con las condiciones de operación establecidas inicialmente.

- A partir del análisis de convergencia de malla, se evidencia que, utilizando un número bajo de elementos en la discretización, se presentaban variaciones significativas en los valores del torque obtenido. Sin embargo, a partir de aproximadamente los 900.000 elementos, la diferencia en los resultados comienza a reducirse hasta el 3%, lo que refleja que el mallado de la geometría está alcanzando la convergencia numérica; Lo que termina de confirmarse con el ultimo refinamiento realizado en donde para un total de 1'039.122 elementos, se obtiene una variación del

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

1,43%, valor que permite considerar la solución como independiente de la malla. Este análisis, se realizó teniendo en cuenta, el número máximo de elementos permitido por Ansys, que se establece en aproximadamente 1'043.000 elementos, restringiendo la posibilidad de continuar con un mayor refinado.

8. Recomendaciones

- Se recomienda para futuros proyectos, aumentar el recurso computacional disponible para, así como disponer de una versión más profesional del software utilizado. Esto permitirá obtener mayor calidad en el mallado, maximizando la precisión de los resultados que arroje la simulación. De igual forma, un mayor recurso de computación facilitaría la ejecución de un mayor número de iteraciones durante periodos más prolongados, lo que permitirá profundizar en el análisis del comportamiento hidráulico de la turbina.
- Para futuros proyectos, se sugiere desarrollar la geometría directamente en el entorno de Ansys, ya que esto permite un mayor control durante la definición del dominio computacional y las condiciones de frontera, al tiempo que evita interferencias, incongruencias geométricas u obstrucciones que suelen presentarse al importar modelos desde otros programas; Mejorando así la estabilidad y confiabilidad de la simulación.
- Se recomienda para futuros proyectos realizar el estudio de esta simulación en estado transitorio, con el objetivo de comparar los resultados que se obtengan, con los recogidos en este proyecto bajo estado estacionario. Con este análisis se lograría evaluar la variación temporal de las diferentes variables del proceso, así como identificar posibles variaciones asociadas a la interacción entre el flujo y el rodete. De esta manera, se amplía el estudio del comportamiento del flujo en este tipo de turbinas al incorporar una representación dependiente del tiempo, facilitando el contraste de resultados entre ambos enfoques.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

- Este proyecto se enfocó en estudiar el comportamiento hidráulico y energético de la turbina, analizando variables como la potencia generada, así como los campos de velocidad y presión durante el proceso. No obstante, para trabajos futuros sería de interés complementar el estudio mediante un análisis de esfuerzos mecánicos sobre la turbina durante su funcionamiento. Este tipo de estudio permitiría identificar la distribución de tensiones y posibles zonas críticas asociadas a elevadas cargas que se puedan generar en el proceso, brindando información valiosa para el diseño estructural o la validación integral del desempeño de la turbina.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Referencias bibliográficas

- Acharya, N., Kim, C. G., Thapa, B., & Lee, Y. H. (2015). Numerical analysis and performance enhancement of a cross-flow hydro turbine. *Renewable Energy*, 80, 819–826. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.064>
- Ansys Inc. (2015, febrero 12). *Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topics. Introduction to Ansys meshing*. https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro_16.0_L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf
- Austria, A., & González, D. (2022). Qué tan viables son las grandes hidroeléctricas en Colombia. *Dialogue Earth*.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2004). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones* (1a ed.).
- Fernández Díez, P. (s/f). *DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA TURBINAS HIDRÁULICAS*. Recuperado <http://www.termica.webhop.info/>
- Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos* (1a ed.). Reverté.
- Gómez González, S. (s/f). *Mallado y simulación CFD de automóvil*.
- Hernandez, C., & Indacochea, E. (1988). *Apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas* (Vol. 1). OLADE.
- Lintermann, A. (2020). *Clinical and Biomedical Engineering in the Human Nose* (K. Inthavong, N. Singh, E. Wong, & J. Tu, Eds.). Springer.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Maria, J., & Sarrazin, V. (2016). *MALLADO DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS MEDIANTE CFD*.

<https://core.ac.uk/download/pdf/81577803.pdf>

Mereke, N. B., Ancha, V. R., & Hendrick, P. (2024). Numerical modeling and CFD simulation of diffuser augmented dual vertical axis hydrokinetic Banki-Michell turbine. *Heliyon*, 10(5).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26970>

Moreno, J. F. (2022). *Sobre las ecuaciones de Navier Stokes* [Universidad Pontificia Javeriana].

[https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/59151/NS%20Final-2-](https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/59151/NS%20Final-2-58_merged.pdf?sequence=10&isAllowed=y)

[58_merged.pdf?sequence=10&isAllowed=y](https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/59151/NS%20Final-2-58_merged.pdf?sequence=10&isAllowed=y)

Orge, J., Gómez Gómez, I., Andrés, E., Higueta, P., & Paredes Gutiérrez, C. A. (2008). La turbina Mochell-Banki y su presencia en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos-Número, 17*.

Osses, J. (2016, diciembre 16). *El método de volúmenes finitos*.

Perezagua, R. L. (2023, noviembre). *ESTADO DEL PROBLEMA DEL MILENIO: LAS*

ECUACIONES DE NAVIER-STOKES. 1–2. [https://www.revistanuclear.es/wp-](https://www.revistanuclear.es/wp-content/uploads/2023/12/Art-Navier-Stokes.pdf)

[content/uploads/2023/12/Art-Navier-Stokes.pdf](https://www.revistanuclear.es/wp-content/uploads/2023/12/Art-Navier-Stokes.pdf)

Romero, F., Velásquez, L., & Chica, E. (2020). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-

Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 23–46. [https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021003)

[2021003](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021003)

Salvador, M., Castro, A., Sebastian, J., & Piedrahita, D. (2018). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN*

SISTEMA “PLUVIO-ELÉCTRICO” ADAPTABLE A LA REGIÓN DEL CHOCÓ

BIOGEOGRÁFICO COLOMBIANO.

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Sammartano, V., Aricò, C., Carravetta, A., Fecarotta, O., & Tucciarelli, T. (2013). Banki-Michell optimal design by computational fluid dynamics testing and hydrodynamic analysis.

Energies, 6(5), 2362–2385. <https://doi.org/10.3390/en6052362>

Sierra-Moreno, D., Romero-Menco, F., Velásquez-García, L. I., Rubio-Clemente, A., & Chica, E.

(2024). Recomendaciones para la realización y análisis de pruebas experimentales en turbinas

hidráulicas tipo Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 23(2).

<https://doi.org/10.18273/revuin.v23n2-2024004>

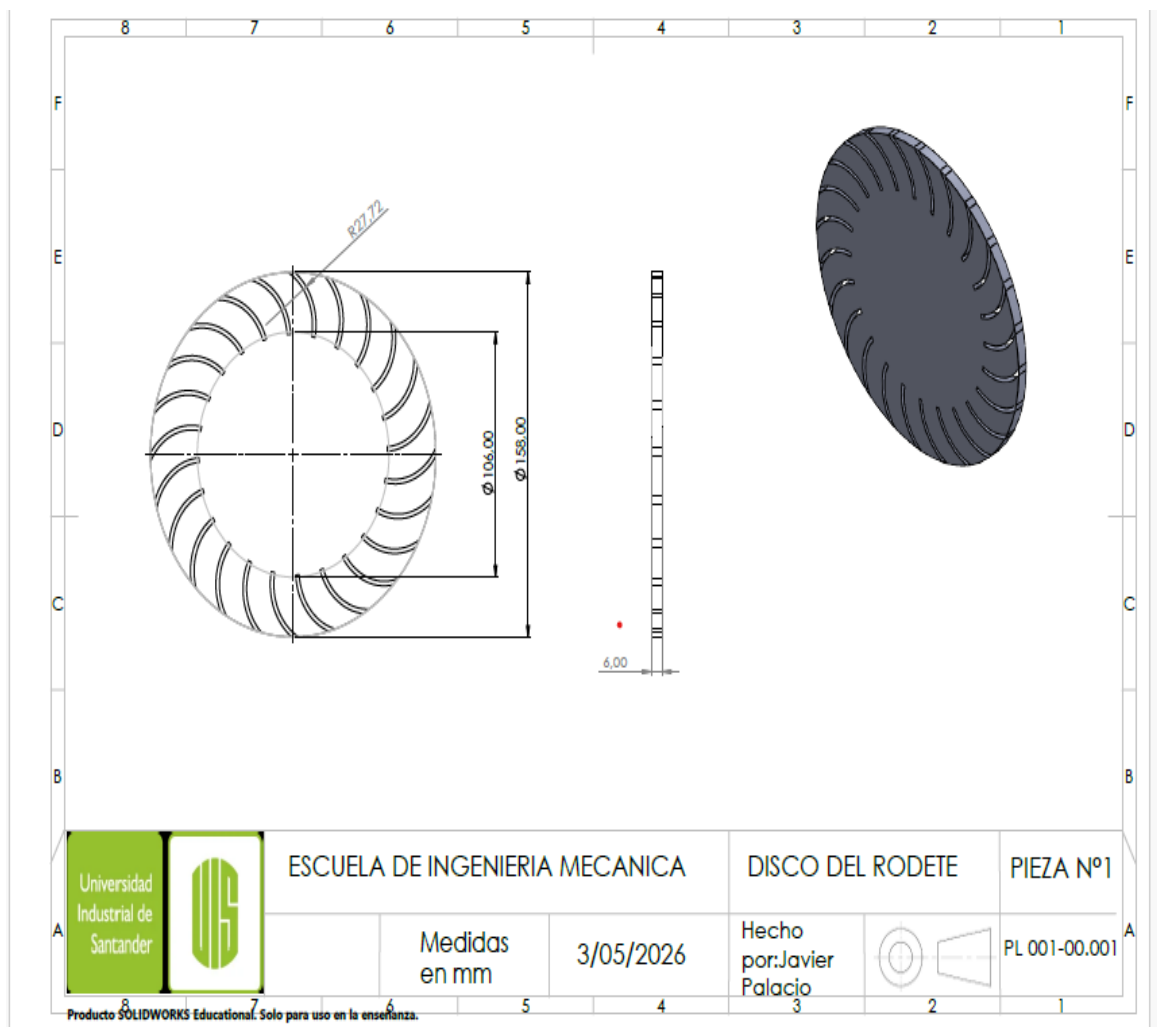
TecnoTurbinas. (2007, abril 28). *Calcular la potencia de una turbina*.

Turbinas Hidráulicas. (2015). <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Apéndices

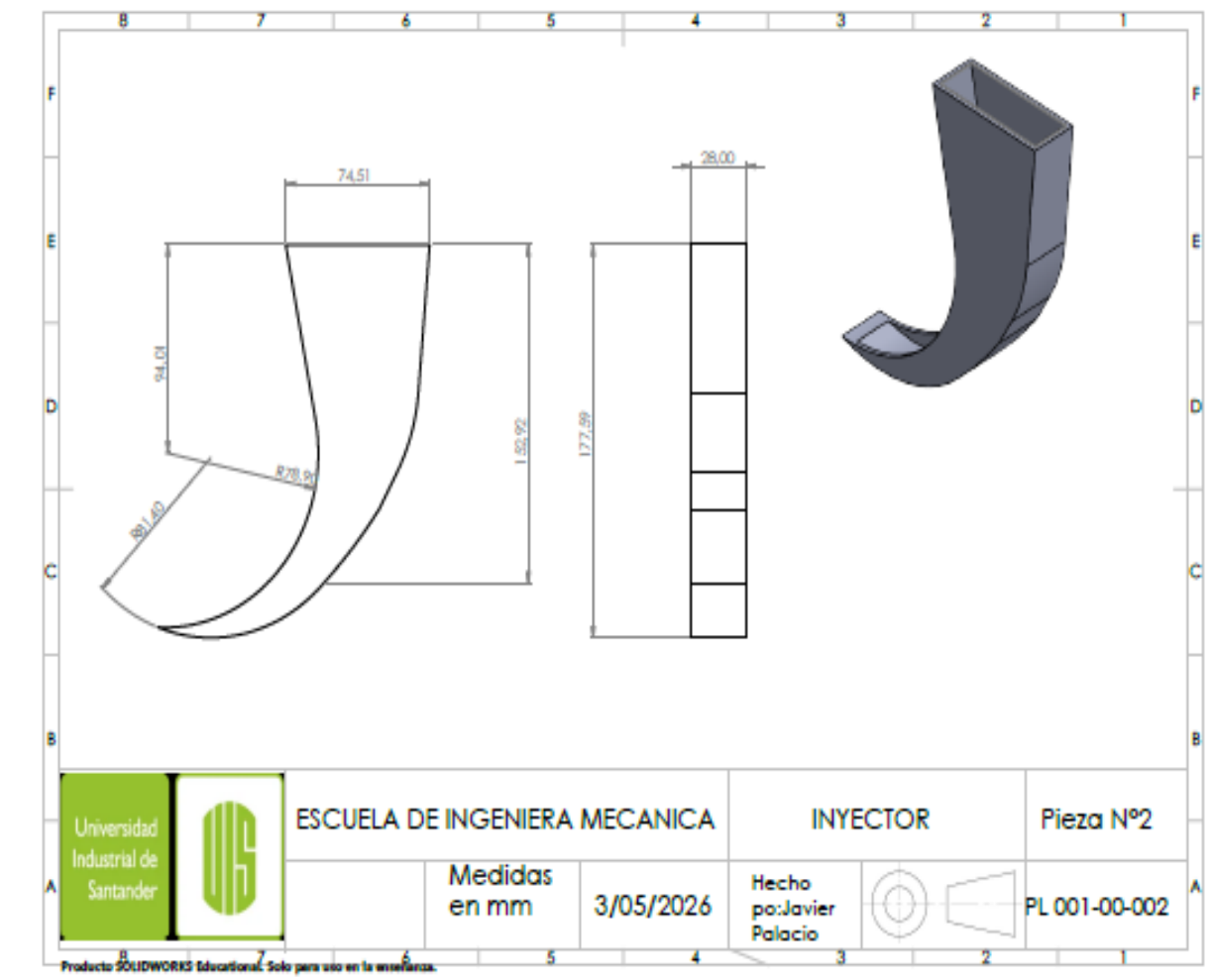
Apéndice A

Plano rodete de la turbina

SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Apéndice B

Plano inyector de la turbina



SIMULACION TURBINA MICHELL-BANKI

Apéndice C

Plano álabo

