

Simulación de una turbina Savonius implementando las herramientas de CFD para la producción de energía en ríos.

Andrés Felipe Galvis Silva y Santiago Lozano Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

PhD. Manuel de Jesús Martínez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis padres: Alirio y Sandra, que el esfuerzo de su vida se refleje en el éxito de sus dos hijos.

A mi hermana: Carolina, que por ella hay ahora dos ingenieros en la familia.

A mi novia: Laura, que sigas impulsando mi vida y yo la tuya, que nuestro amor sea más grande que cualquier distancia que nos pueda llegar a separar.

A mis colegas mecánicos: Wilman, Javier, Bobby, María Camila, Sergio, James, Julián y Jesús, que disfrutemos el resto de nuestra vida en la misma forma que disfrutamos los últimos años: juntos.

A los amigos que me dejó la universidad: Checho, Violeta, Lucía, Rayo, Nathalia, Gabriel, Nicolás y Aldo que, por personas como ustedes, el mundo es un bonito lugar.

A mi compañero de proyecto: Sammy, que este sea solo el inicio de una carrera profesional llena de éxitos para los dos.

A mis nonitas: Matilde e Isabel, que mis logros, como los del resto de la familia, son tan de ellas como nuestros.

Andrés Felipe Galvis Silva.

Dedicatoria

A mis padres: William y Janny, que son la razón de este logro.

A mi hermano: Sebastian, que era una alegría en los momentos más difíciles.

A mis nonitas Claudina y Leopoldina que formaron la persona que soy.

A mis tíos: Albert, Carlos, Zulay, Javier, Milena, Patricia, Laura y Julián que siempre me han ayudado a alcanzar metas.

A los amigos que me dejó la universidad: Ángel, Héctor, Jesús, Sebastián, German que hicieron ameno mi paso por la universidad

A Enlace que siempre está presente en mi vida.

A mi compañero de proyecto: Andrés, que sin duda será un gran profesional y amigo.

Santiago Lozano Gómez.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por los espacios y oportunidades brindadas, por aceptarnos para ser parte de su comunidad y por ayudarnos con el proceso de crecimiento tanto profesional como personal en los años que estuvimos en ella.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindar las herramientas necesarias para seguir el camino hacia un sueño: ser Ingenieros Mecánicos de la Universidad Industrial de Santander.

A nuestro director de tesis, Manuel del Jesús Martínez, por recibir con agrado este proyecto, por su ayuda brindada estos dos últimos semestres, y por demostrar que se puede ser un gran ingeniero y una gran persona a la vez.

Al claustro de profesores de la escuela de Ingeniería Mecánica, por ser parte fundamental en el proceso de formación profesional de miles de profesionales en Colombia y el mundo.

Andrés Felipe Galvis Silva.

Santiago Lozano Gomez.

Tabla de Contenido

	pág.
Dedicatoria.....	2
Agradecimientos	4
Introducción	14
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Antecedentes	19
3. Referentes Teóricos	22
3.1 Generalidades de las Turbomáquinas Hidráulicas	22
3.2 Turbinas Hidrocinéticas	25
3.2.1 THC's de Flujo Axial.....	27
3.2.2 THC's de Flujo Cruzado o Transversal.....	28
3.2.3 Potencia y Coeficiente de Potencia en Turbinas Hidrocinéticas	29
3.2.4 Coeficiente de Momento en Turbinas Hidrocinéticas	30
3.2.5 Límite de Betz.....	31
3.2.6 Tip Speed Ratio (TSR) o Razón de la Velocidad de Punta	32
3.2.7 Las Curvas $C_p - \lambda$	32
3.3 Turbina Savonius	34
3.4 Dinámica de Fluidos Computacional.....	36
3.4.1 Preprocesamiento.....	37

3.4.2 Procesamiento	38
3.4.3 Post-procesamiento	38
3.4.4 Modelos de Turbulencia	39
3.4.5 Mallado	43
3.4.6 Tipos de Malla	45
3.4.7 Reducción del Comportamiento del Flujo a Dos Dimensiones	47
3.5 ANSYS Fluent	48
3.6 Método de Discretización en CFD	48
4. Metodología	52
4.1 Descripción del Fenómeno	52
4.2 Modelo CFD	52
4.3 Dominio y Geometría	53
4.4 Mallado del Modelo CFD	55
4.5 Ecuaciones Gobernantes	57
4.5.1 Algoritmo SIMPLE	58
4.5.2 RANS	62
4.5.3 Problema de Cierre	64
4.5.4 Modelo SST $k - \omega$	65
4.6 Modelación y Simulación	67
4.6.1 Validación y Verificación del Modelo	67
4.6.3 Independencia de Malla y Tiempo	73
4.6.4 Esquemas Numéricos	78
5. Resultados	79

5.1 Curvas de Comportamiento	79
5.2 Estructura del Flujo.....	82
5.3 Análisis del Potencial Energético	84
6. Conclusiones.....	87
7. Recomendaciones	90
8. Trabajos futuros	91
Referencias Bibliográficas.....	93

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Mapa de caracterización ZNI.	15
Figura 2. Partes principales señaladas de una turbina de generación de energía.....	24
Figura 3. Ilustración de una turbina hidrocínética tipo Gorlov en un cuerpo de agua.....	26
Figura 4. Turbinas hidrocínéticas de flujo axial de: a) eje inclinado, b) amarre rígido, c) generador no sumergido y d) generador sumergido.	27
Figura 5. Turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado: a) de eje horizontal, b) jaula de ardilla Darrieus, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Gorlov y f) Savonius.....	28
Figura 6. Comparación de coeficientes de potencia entre diferentes tipos de turbinas eólicas, con el límite de Betz indicado.	33
Figura 7. Ilustración de una turbina Savonius para trabajo con agua.	34
Figura 8. Esquema de una Turbina Savonius impulsada por aire, con las fuerzas de arrastre incidentes.	35
Figura 9. Muestra de post-procesamiento: Aplicación de CFD para un tanque de paso.	39
Figura 10. Ilustración gráfica de los diferentes modelos RANS, ordenados de menor a mayor gasto computacional.....	41
Figura 11. Conectividad entre celdas vecinas.....	44
Figura 12. Ilustración de una malla estructurada junto a sus índices locales y topología.	46
Figura 13. Malla no estructurada, indexación global.....	47
Figura 14. Mallado triangular (A), y mallado rectangular (B).	50
Figura 15. Representación gráfica del método de discretización.	51
Figura 16. Vista frontal del dominio.....	54

Figura 17. Vista específica de la turbina Savonius en el dominio, junto a sus medidas importantes.....	54
Figura 18. Mallado en la zona de la turbina Savonius.	56
Figura 19. Vista específica del mallado en la zona de contacto entre la pala de la turbina y el fluido.	56
Figura 20. Diagrama de flujo del bucle del algoritmo SIMPLE.....	61
Figura 21. Medida de una variable cualquiera con flujo turbulento en el tiempo.	62
Figura 22. Datos experimentales de coeficiente de potencia en el rango de 0.6 a 1 TSR usados para la validación del modelo.	68
Figura 23. Datos experimentales de coeficiente de momento en el rango de 0.6 a 1 TSR utilizados para la validación del modelo.....	69
Figura 24. Esquema 2D del rotor con dos palas utilizado para la obtención de los resultados experimentales.	70
Figura 25. Resultados de la validación para coeficiente de potencia.	71
Figura 26. Resultados de la validación para coeficiente de momento.	71
Figura 27. Comparación de los resultados para 2 giros de la turbina con las diferentes mallas en prueba.....	74
Figura 28. Curva de Momento VS Ángulo de rotación para la simulación de la turbina a 8 vueltas.	76
Figura 29. Gráfica comparativa de los resultados obtenidos para diferentes θ	77
Figura 30. Curva de comportamiento C_p Vs Tip Speed Ratio para la turbina Savonius en agua. 80	
Figura 31. Curva de comportamiento C_m Vs Tip Speed Ratio para la turbina Savonius en agua.	81

Figura 32. Contorno de velocidad para $TSR=0.9$ 82

Figura 33. Contorno de presión para $TSR=0.9$ 83

Lista de Tablas

Tabla 1. Métodos de discretización de cada Solver.....	53
Tabla 2. Dimensiones de modelación del dominio de la turbina.....	55
Tabla 3. Tabla comparativa de los resultados de la simulación con los datos experimentales.....	72
Tabla 4. Comparación entre los resultados para TSR 0.6 y TSR 1 con los datos de otros estudios.	73
Tabla 5. Comparación de los resultados de TSR 1 entre las diferentes mallas probadas.	75
Tabla 6. Esquemas numéricos generales de entrada para las simulaciones.....	78
Tabla 7. Informe mensual de telemetría para la localidad de Alto Estero.	84

Resumen

Título: Simulación de una turbina Savonius implementando las herramientas de CFD para la producción de energía en ríos.*

Autores: Santiago Lozano Gómez, Andrés Felipe Galvis Silva.**

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, CFD, Turbinas hidrocinéticas, Análisis energético, Energía hidrocinética.

Descripción: Las energías renovables se han convertido en un tema de suma importancia para la ingeniería moderna, el avance mundial que busca reducir la huella de carbono en el planeta es prueba de ello, así mismo, Colombia está comprometido con la transición hacia las energías renovables aprovechando los recursos disponibles, como lo es el potencial hidrológico del país. En este campo se encuentra una población de especial interés para las pruebas piloto de estos proyectos: las zonas no interconectadas de Colombia, estas poblaciones de difícil acceso, en muchos casos, tienen disponibilidad de recursos hídricos que pueden ser aprovechados para cumplir sus necesidades, por ello, se plantea el uso de turbinas hidro cinemáticas en un río. Este tipo de turbinas tienen una gran variedad, entre estas llaman la atención las turbinas Savonius por su buen funcionamiento en bajos caudales y capacidad de arranque. Lo anterior motiva la presente investigación en la que se simuló una turbina Savonius en una velocidad de 1m/s, utilizando el programa ANSYS Student 2022, utilizando una estructura bidimensional en un flujo transitorio, utilizando el modelo de turbulencia Shear Stress Transport (SST) K- ω , contrastándolo con valores experimentales para una configuración similar. Finalmente se estableció que bajo estas condiciones el punto de funcionamiento óptimo es en una Razón de Velocidad de Punta (TSR por sus siglas en inglés) de 0.9 con una potencia de 5.6 Watts, que puede generar un total de 4.0248 kWh en un mes, concluyendo que 133 turbinas suplen el 100% de la energía suministrada para 121 habitantes en la localidad de Alto Estero, Maguí Payán, Nariño.

*Trabajo de grado.

**Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Director: D. Sc Manuel del Jesús Martínez.

Abstract

Title: Simulation of a Savonius turbine implementing CFD tools for energy generation in rivers.*

Authors: Santiago Lozano Gómez, Andrés Felipe Galvis Silva.**

Key words: Computational fluid dynamics, CFD, Hidrokinetic turbines, Energy análisis, Hydrokinetic energy.

Description: Renewable energies have become a topic of utmost importance for modern engineering, the global progress that seeks to reduce the carbon footprint on the planet is proof of this, likewise, Colombia is committed to the transition towards renewable energies taking advantage of the available resources, such as the hydrological potential of the country. In this field there is a population of special interest for the pilot tests of these projects: the non-interconnected areas of Colombia, these populations, although difficult to access, have, in many cases, access to water resources that can be used for meet their needs, therefore, the use of hydrokinetic turbines in a river is proposed. This type of turbines is found in a wide variety, among these the Savonius turbines draw attention due to their performance at low flows and starting capacity. The above motivates the present investigation in which a Savonius turbine was simulated at a speed of 1m/s, using the ANSYS student 2022 program, using a two-dimensional structure in a transient flow, using the Shear Stress Transport (SST) K- ω turbulence model, contrasting it with experimental values. for a similar setup. Finally, it was established that under these conditions the optimal operating point is in Tip Speed Ratio 0.9 with a power of 5.6 Watts, which can generate a total of 4.0248 kWh in one month, concluding that 133 turbines supply 100% of the energy supplied for 121 inhabitants. in the town of Alto Estero, Maguí Payán, Nariño.

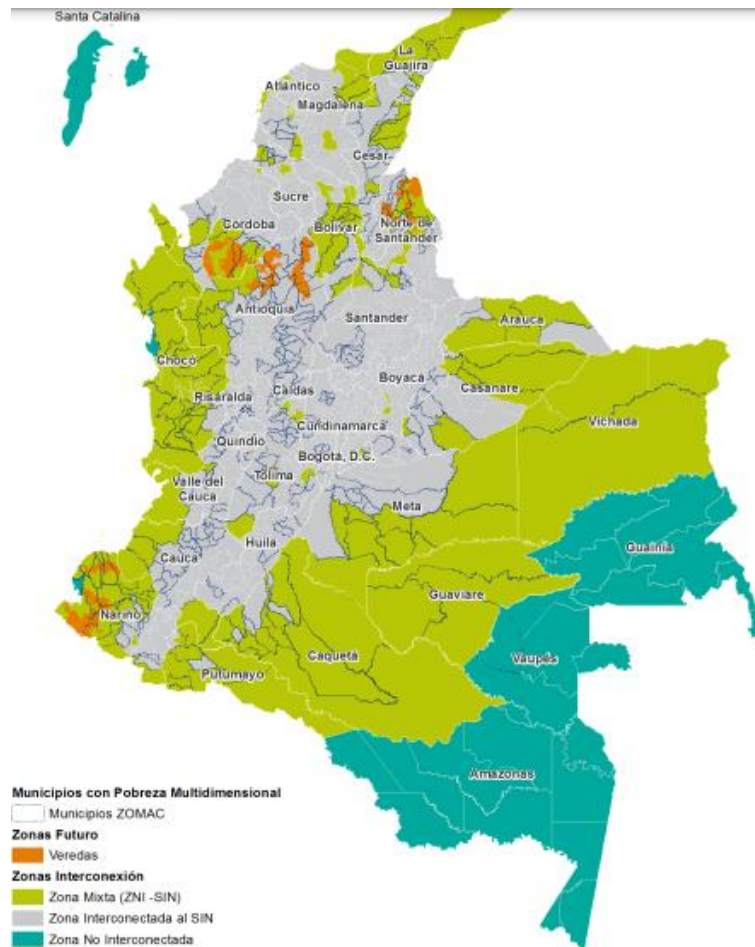
* Degree work

** Faculty of physicommechanical engineering. School of mechanical engineering. Director: D.Sc. Manuel del Jesús Martínez.

Introducción

El documento “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development”, fue creado por la cumbre de las Organización de las Naciones Unidas para la adopción de la agenda de desarrollo posterior a 2015, celebrada en Nueva York del 25 al 27 de septiembre de ese año. En esta agenda se encuentran 17 objetivos de desarrollo sostenible entre los cuales se incluye desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, el refuerzo de la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente y el diseño de las ciudades. Específicamente en el séptimo objetivo de desarrollo, la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015, p.14) propone: “Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all” [Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos].

Durante el transcurso de la agenda los países miembros de la Organización de las Naciones Unidas presentan informes sobre los objetivos de desarrollo sostenible. Colombia, en su reporte anual del año 2020 realizado por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE, 2020), reportó que uno de sus principales retos es la cobertura energética, en la meta 4. 7.1, siendo las zonas rurales las que carecen de cobertura, principalmente. En Colombia estas zonas están descritas según el artículo primero de la Ley 855 de 2003: “Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectadas al Sistema Interconectado Nacional, SIN”.

Figura 1.*Mapa de caracterización ZNI.*

Nota. El mapa muestra la subdivisión de Colombia basado en el estado energético de cada zona. Tomado de *Rendición de cuentas* (p.23), por el IPSE, 2022. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.

Entre los principales problemas para la conexión de estas zonas se encuentra la accesibilidad a ellas, no obstante, como posibles soluciones se ha propuesto desarrollar energías alternativas que puedan ser ejecutadas mediante proyectos en estas zonas. Colombia cuenta con

una oferta hídrica en todo su territorio que podría ser aprovechada para generar micro estaciones de generación o proyectos más pequeños que contribuyan a la cobertura de las zonas.

El desarrollo tecnológico actual busca maximizar el aprovechamiento de los recursos, aunque pueden verse obstaculizados por limitantes externos difíciles de eliminar, como pérdidas o falta de eficiencia en los procedimientos. El cuidado del medio ambiente es una necesidad en constante intensificación durante los últimos años, siendo uno de los principales ejes del avance a la vanguardia, donde se propone el desarrollo de tecnologías que permitan la obtención de energías limpias o de baja huella de carbono para suplir las necesidades de la sociedad de forma sostenible

Dichas energías usan recursos renovables y aprovechan sus cauces naturales en un proceso paralelo en beneficio de la humanidad, por esto, en los últimos años se ha avanzado en tecnologías como la obtención por energía solar, eólica o hidrocínética, siendo esta última una alternativa que aprovecha las corrientes naturales de agua en lugar de aprovechar grandes cabezas, tomando la energía cinética del río y transformándola en energía eléctrica.

Ahora bien, en Colombia la energía obtenida por fuentes hídricas es destacable, tanto así que esta constituye el 70% del sistema eléctrico nacional, mediante represas que almacenan gran cantidad de recursos hídricos tomados de los diferentes cauces internos del país, resultando en una energía disponible para las principales zonas urbanas , pero dejando de lado, claramente, a las ZNI, pues su difícil acceso hace tortuosa la tarea de construir infraestructura que los interconecte a cualquier zona ya conectada.

Frente a lo planteado, la energía hidrocínética funge como una alternativa a considerar, pues para su implementación no es necesario construir grandes complejos hidroeléctricos, ni usar

turbinas de gran tamaño, además de que se pueden implementar en cualquier río cercano a la zona que cuente con una velocidad de caudal promedio de cualquier río de Colombia y su daño ecológico es casi nulo si se compara con el realizado en la construcción de una represa, posicionando así, a la energía hidrocínética como una posible solución para el problema energético del país, quedando finalmente la pregunta para la investigación: ¿Cómo es el rendimiento energético de una turbina Savonius inducida por velocidades características de una corriente de agua en ríos?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Para el presente proyecto se tiene por objetivo general:

- Simular una turbina Savonius con las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional de Ansys Fluent, para evaluar su potencial hidráulico en un río considerando una velocidad de corriente de 1 m/s.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros necesarios para la simulación, como lo son: el dominio, la densidad de malla, geometría de celda, modelo de turbulencia, número de iteraciones, entre otros.
- Validar los resultados de la simulación y compararlos con otros resultados presentes en el estado del arte.
- Analizar la eficiencia en la producción de energía mediante cálculos relacionados con su rendimiento de la simulación.

2. Antecedentes

El avance en diversas energías renovables es un tema a la vanguardia para la humanidad, se invierten diariamente grandes cantidades de dinero en investigación, infraestructura y tiempo con el fin de encontrar avances tecnológicos que impacten este ámbito. Es así como para el estudio de estas tecnologías se hace fundamental un repaso de la literatura en el aspecto científico de las turbinas hidro cinemáticas, todo esto se realiza con el fin de acercarse un poco más al tema y así obtener una perspectiva acerca los elementos clave en la resolución del problema, es así como se han encontrado diferentes antecedentes en el desarrollo de turbinas savonius hidro cinemáticas como lo son:

Inicialmente el estudio " A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications" (Maldar, et al., 2020), realiza una introducción a la energía hidrocínética en la cual aborda los diferentes tipos de turbinas que pueden ser utilizadas y posteriormente se enfoca en la turbina Savonius como método para su extracción, adicionalmente presenta varios modelos y diseños para su uso, por lo cual discute y analiza según las condiciones del sistema para el diseño adecuado usando herramientas computacionales y revisión de literatura para brindar un panorama general de las turbinas Savonius, no obstante también hacen la nota aclaratoria que es importante seguir investigando sobre la aplicación hidrocínética de estas.

"Optimization of semicircular blade profile of Savonius hydrokinetic turbine using artificial neural network" (Seb, et al., 2022), proyecto que fue llevado a cabo en India bajo la premisa de la fácil producción a nivel local, por lo cual se buscaba establecer las mejores

condiciones para una turbina Savonius. En su procedimiento se optimizó una turbina semicircular mediante CFD y la optimización estuvo a cargo de “artificial neural network”, dando como resultado las condiciones más importantes que inciden sobre el coeficiente de poder y posteriormente siendo optimizadas para obtener que el mejor desempeño se encuentra a 166° .

Por su parte en “Development of statistical relationship for the potential assessment of hydrokinetic energy” (Sood, et al., 2022), se toma la iniciativa como una alternativa potencial para la obtención de energía hídrica en Australia. En el apuntan a diseñar una turbina savonius para su uso en un canal a diferentes velocidades tomando en cuenta las limitaciones de flujo conocidas, es así como se logra determinar un mínimo de profundidad y distancia para el correcto funcionamiento de la turbina en ríos además de esto se encuentra que estas son dependientes de tanto la velocidad como el diámetro de turbina.

Así también el estudio “Experimental verification of improved performance of Savonius turbine with a combined lift and drag based blade profile for ultra-low head river application” (Busumatory, et al., 2021) introduce inicialmente las características básicas de la turbina Savonius como sus ventajas que son su funcionamiento con cabezas ultra bajas y bajas velocidad, y también sus desventajas como lo son su bajo desempeño, por lo que el estudio apuntó a modificar una turbina Savonius con el fin de optimizar sus álabes mejorando su producción de energía .

Continuando con el uso de las turbinas Savonius en el artículo “Performance analysis of Savonius hydrokinetic turbine capturing wave energy under different operating strategies” (Yao, et al., 2022) se utilizaron diferentes estrategias para la obtención de dicha energía mediante la turbina, en él se presentan alternativas para la operación de las turbinas Savonius las cuales consisten en variar las condiciones de instalación, por ejemplo, sumergirlo a mayor o menor

profundidad o en un ángulo adecuado. En sus resultados demuestran que el nivel de sumergimiento óptimo de la turbina está relacionado estrechamente a su diámetro, no obstante, para diversas condiciones pueden darse casos de mayor eficiencia, pero generalmente para la máxima obtención de energía se recomienda un sumergimiento igual a 0,75, su diámetro.

3. Referentes Teóricos

3.1 Generalidades de las Turbomáquinas Hidráulicas

Una turbomáquina hidráulica hace parte de la familia de las máquinas hidráulicas, que, como lo dice García (2011) básicamente son dispositivos que manejan fluidos de forma que la variación en la densidad no sea considerable a la hora de fluir por esta, considerándose los fluidos que manejan incompresibles (densidad constante) para efectos de cálculo y diseño. Otros dispositivos dentro de la familia de las máquinas hidráulicas son los ventiladores y las bombas. Ya cuando el fluido logra obtener una variación considerable en su densidad, las máquinas pasan a llamarse máquinas térmicas, tal como lo son los turbocompresores, turbinas de gas y de vapor.

Dentro de las máquinas hidráulicas, las turbinas forman parte del grupo de las turbomáquinas, siendo estas donde la dirección del flujo y la magnitud de la velocidad constituyen una gran importancia y donde la transferencia de energía entre el rodete y el fluido, está gobernado por la ecuación de transferencia de energía de Euler. En contraparte a las turbomáquinas, existen las máquinas de desplazamiento positivo, donde la transferencia se hace por presiones generadas por cambios de volumen, y la dirección del flujo y magnitud de velocidad no cobran importancia, como es el caso de las bombas de engranajes, paletas, cilindros hidráulicos, etc.

En las turbomáquinas hay dos divisiones principales: las turbomáquinas motoras, que absorben energía mecánica y restituyen esa energía al fluido, llamándose bombas cuando manejan líquidos, y ventiladores si el fluido es gaseoso; el otro subgrupo son las turbomáquinas

generadoras, que absorben energía del fluido, restituyéndola en energía mecánica, este subgrupo está constituido completamente por turbinas, sin importar el tipo de fluido que se maneje.

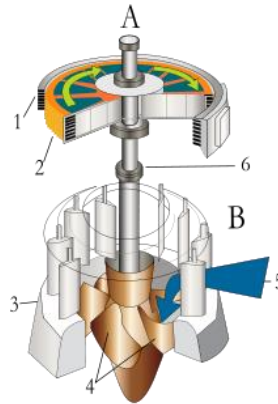
Hablando ya específicamente de las turbinas hidráulicas, a estas se les define como máquinas que transforman la energía de un fluido (normalmente agua), sea cinética o potencial, en energía mecánica rotacional. En el caso del agua, puede darse tanto por la caída en un salto de agua o, por la corriente que lleva la misma. Normalmente, la energía rotacional generada, se utiliza para generar energía eléctrica, mediante la unión de la turbina a un generador en las centrales hidroeléctricas.

Dicho en pocas palabras, una turbina hidráulica sirve para convertir la energía del agua en mecánica y, aplicada a la generación de energía, se usa para convertir la mecánica a eléctrica también. Este tipo de energía se conoce como energía hidráulica, y su método de generación es uno de los más usados a nivel mundial, y el más usado en Colombia, ya que, como se mencionó con anterioridad, aporta el 70% de la matriz energética del país, esto siendo explicado, entre otras cosas, por la facilidad geográfica de instalar hidroeléctricas, y por el alto rendimiento de transformación de energía con el que las turbinas cuentan.

Los sistemas de generación de energía con turbinas hidráulicas constan de diferentes partes, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2.

Partes principales señaladas de una turbina de generación de energía.



Nota. Tomado de *Turbinas hidráulicas* [En línea]

https://www.wikiwand.com/es/Turbina_hidr%C3%A1ulica

De donde:

A: Es el sistema de generación de energía, unido a la turbina para convertir su energía rotacional. Este sistema cuenta con:

1. Estator.
2. Rotor.

B: La turbina, que recibe la energía cinética o potencial del líquido para transformarla en rotacional, y así mover el rotor (2). La turbina consta de:

3. Válvulas regulables de paso de caudal.
4. Paletas para aprovechar el movimiento del agua.
5. Entrada de flujo de agua.

El eje de rotación es compartido por ambos sistemas (6).

Las turbinas hidráulicas, al ser turbomáquinas, se ven clasificadas de forma similar: tomando en cuenta el cambio en la presión del rodete, el grado de reacción, y el diseño del rotor.

- Para las turbinas hidráulicas, se llaman radiales-axiales, cuando el fluido entra al rotor en forma radial para luego salir de forma axial, en la misma dirección del eje; se les llama axiales, cuando el fluido tanto cuando entra como cuando sale, lo hace en dirección axial paralelo al eje; y, se le llama tangencial, cuando el fluido solo golpea el rotor en la periferia.
- De acuerdo con su reacción, se llaman de acción cuando el fluido mueve la turbina golpeando directamente las paletas del rotor, siendo necesario una caída alta del fluido para que golpee con fuerza; y, de reacción, cuando el fluido mueve el rodete no por golpe, sino por reacción provocada por la salida del agua sobre el rotor, siendo necesario un caudal grande para que el agua se transporte por las tuberías con gran presión para que mueva el rotor con fuerza.

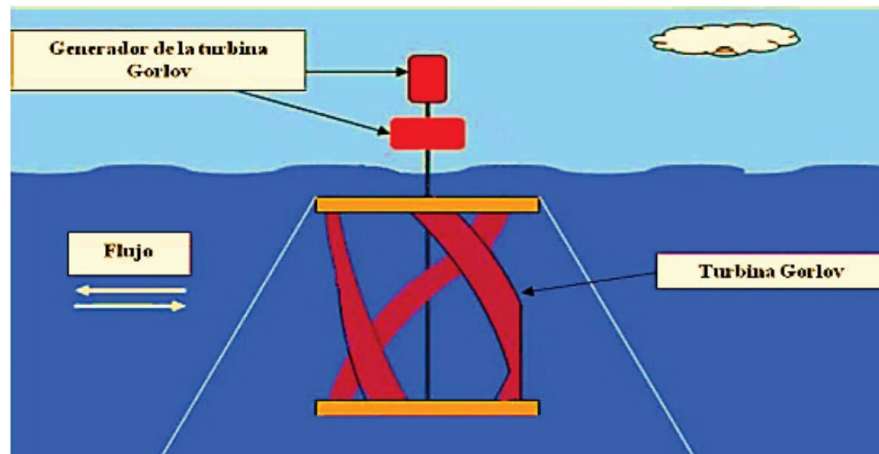
3.2 Turbinas Hidrocinéticas

Las turbinas hidrocinéticas (THCs, por sus siglas en español), como su nombre lo indican, son turbinas que aprovechan únicamente el componente cinético de las corrientes del agua, es decir, la velocidad. Este tipo de turbinas surgió como una especie de adaptación de las turbinas eólicas para la hidráulica, permitiendo así aprovechar los cuerpos de agua, sin la necesidad de construir grandes complejos hidroeléctricos, minimizando el impacto ambiental y

las grandes inversiones de capital, pero sacrificando buena parte del rendimiento energético (Cereidijo,2022).

Figura 3.

Ilustración de una turbina hidrocínética tipo Gorlov en un cuerpo de agua.



Nota. Tomado de *Diseño de un banco de ensayos de turbina hidrocínética tipo Gorlov para el laboratorio de termo-fluidos del Instituto Universitario de Tecnología del Estado de Bolívar* (p.21), por Angel García, et al., 2014, Instituto Universitario de Tecnología del Estado Bolívar.

La velocidad del agua es una energía segura, limpia y relativamente fácil de aprovechar gracias a las configuraciones de turbinas hidrocínéticas, pues son aplicables tanto a ríos, mares y canales artificiales creados por el hombre, convirtiendo la velocidad de sus corrientes en potencia mecánica sin interrumpir el flujo natural del agua.

A simple vista, las turbinas hidrocínéticas prometen una alternativa de bajo costo para la extracción de energía, pues no están supeditadas a grandes hidroeléctricas, sin embargo, hay que estudiar cuidadosamente su factibilidad económica, ya que la densidad energética conseguida es

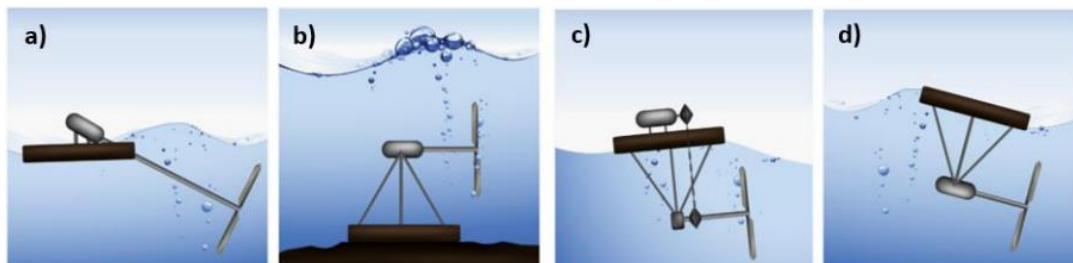
muy menor en comparativa con la obtenida con turbinas hidráulicas tradicionales (Gaden & Bibeau, 2010; Khan, et al, 2009). Las THCs se subdividen esencialmente en dos grupos:

3.2.1 THCs de Flujo Axial

En estas turbinas hidrocínéticas, el eje de rotación es paralelo a la dirección de flujo de la corriente del agua, y sus rodetses son principalmente tipo hélice, por lo cual, también se les conoce como “Turbinas tipo hélice”. Estas THC se caracterizan por tener mejor desempeño que las turbinas de flujo cruzado a las mismas condiciones de trabajo.

Figura 4.

Turbinas hidrocínéticas de flujo axial de: a) eje inclinado, b) amarre rígido, c) generador no sumergido y d) generador sumergido.



Nota. Tomado de *Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature.* (p.4), por Jacobus Vermaark, et al, 2013, Central University of Technology.

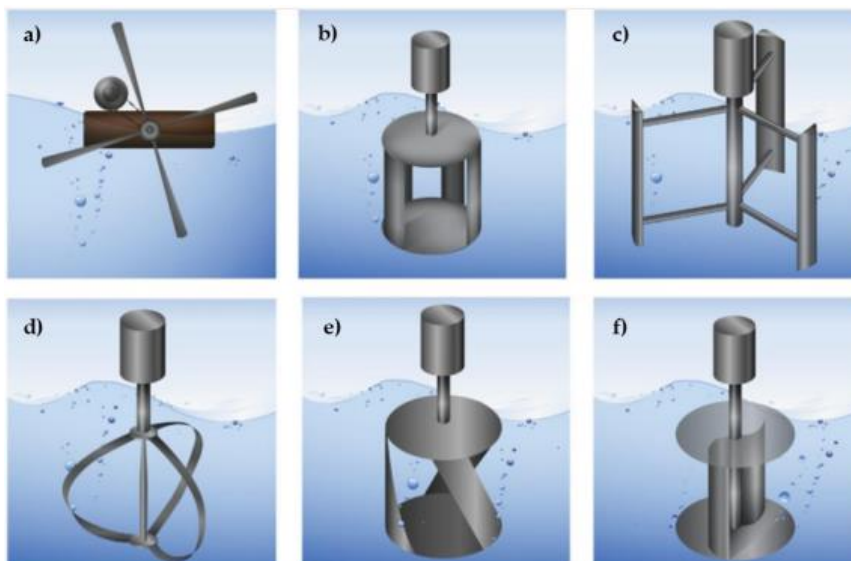
De la figura 4.a, se observa la turbina de eje inclinado, siendo el uso de esta, con más frecuencia, en ríos pequeños, mientras que las demás se implementan principalmente para corrientes oceánicas.

3.2.2 *THCs de Flujo Cruzado o Transversal*

Estas turbinas tienen su eje de rotación perpendicular a la dirección del flujo de la corriente de agua, lo que les permite operar independientemente de la dirección y sentido de este. Dentro de este grupo de turbinas, existe otra subdivisión: Turbinas de eje horizontal y disposición transversal, y turbinas de eje vertical, donde las segundas presentan mejor eficiencia a la hora de convertir energía.

Figura 5.

Turbinas hidrocineéticas de flujo cruzado: a) de eje horizontal, b) jaula de ardilla Darrieus, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Gorlov y f) Savonius.



Nota. Tomado de *Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature.* (p.5), por Jacobus Vermaark, et al, 2013, Central University of Technology.

Hablando específicamente de las THCs de eje vertical, estas cuentan con dos configuraciones básicas: Tipo Diarreus, que tienen perfiles transversales tipo aerodinámicos, que les permite aprovechar las fuerzas de sustentación que genera el contacto con la corriente; y el tipo Savonius que simplemente aprovecha la diferencia entre las fuerzas de arrastre entre la zona cóncava y convexa para generar su propio movimiento.

3.2.3 Potencia y Coeficiente de Potencia en Turbinas Hidrocinéticas

Se puede inferir por su nombre que, las turbinas hidrocinéticas, aprovechan la energía cinética de la corriente de agua de donde son instaladas. Esto quiere decir que, análoga a la de las turbinas eólicas, la potencia teórica para el aprovechamiento de la energía se describe con la siguiente ecuación, que al igual que las demás de la sección, fueron extraídas de “Análisis, de una turbina eólica tipo Savonius por medio de CFD”, de Fajardo (2021).

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h \cdot d \cdot v^3 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

De donde, para unidades del Sistema Internacional:

- ρ representa la densidad del fluido, en este caso, agua $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.
- h es la altura de la turbina $[m]$.
- d es el diámetro de la turbina $[m]$, que junto a h , representa el área de barrido.
- v es la velocidad del fluido incidente $\left[\frac{m}{s}\right]$.

Habiendo aclarado ya que la anterior ecuación es para describir la potencia teórica de aprovechamiento, se debe tener en cuenta la existencia de un rendimiento que define la fracción de potencia del fluido que se transformó en potencia angular, y en este caso viene descrito por un

coeficiente adimensional de potencia (C_p), permitiendo ajustar la ecuación de la potencia de una teórica a una real. Este coeficiente adimensional de potencia se define como se muestra a continuación.

$$C_p = \frac{\text{Potencia transformada por la turbina}}{\text{Potencia teóricamente disponible en el fluido}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Reemplazando ambas potencias por sus respectivas ecuaciones, queda la siguiente relación.

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h \cdot d \cdot v^3} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

De donde, para unidades del Sistema Internacional, representan:

- T el par de fuerza de las aletas [$N \cdot m$].
- ω la velocidad angular de la turbina [$\frac{rad}{s}$].

3.2.4 Coeficiente de Momento en Turbinas Hidrocinéticas

También conocido como coeficiente de par motor, el coeficiente de momento (C_m) es un parámetro adimensional que permite cuantificar el torque generado por el flujo de un fluido a un objeto que esté dentro del mismo. Este coeficiente está directamente relacionado con la presión dinámica del fluido, y se representa, para turbinas de eje vertical, como se muestra a continuación.

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot h \cdot d^2} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde, para unidades del Sistema Internacional, M representa el momento o torque producido por el flujo en el objeto [$N \cdot m$]. Los demás parámetros son equivalentes a los explicados para la ecuación de potencia.

3.2.5 Límite de Betz

Uno de los conceptos más importantes a la hora de estudiar tanto turbinas eólicas como hidrocinéticas es la Ley o Límite de Betz de 1919. El físico alemán, Albert Betz, determinó un límite general para cualquier turbina de las mencionadas anteriormente. Dicho físico descubrió que es físicamente imposible aprovechar más del 59,3% de la energía cinética del fluido incidente, o más exactamente, dieciséis veintisieteavos ($\frac{16}{27}$) partes de esta, siendo el dicho valor, el máximo posible para el coeficiente de potencia (C_p).

$$C_{p \text{ máx}} = \frac{16}{27} \cong 59,3\%$$

Este límite, hasta la actualidad, se supone como un límite teórico, pues la mayoría de las turbinas eólicas e hidrocinéticas usadas hoy en día presentan eficiencias entre 35% y 45% aproximadamente, lo que quiere decir que aún falta mucho para llegar al Límite de Betz en la actualidad. Vale aclarar que este límite físicamente se origina porque este tipo de turbinas frena al caudal del fluido, así que para valores más altos que este límite, la velocidad de salida del fluido sería muy baja, llegando al punto de truncar el flujo, impidiendo el movimiento de la turbina. La velocidad de salida del fluido es cero (0) cuando el coeficiente de potencia es 1 (100% de eficiencia de conversión).

3.2.6 Tip Speed Ratio (TSR) o Razón de la Velocidad de Punta

La Razón de Velocidad de Punta, o Tip Speed Ratio (TSR) es otro parámetro fundamental para el estudio de las turbinas eólicas e hidrocinéticas, y junto al coeficiente de potencia, se usa para definir la curva de comportamiento característica de estas turbinas. Este parámetro representa la relación entre la velocidad de la punta de los álabes con la velocidad del caudal del fluido incidente. También se suele representar con la letra griega “Lambda” (λ), y su ecuación se muestra a continuación.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

De donde, para unidades del Sistema Internacional, representan:

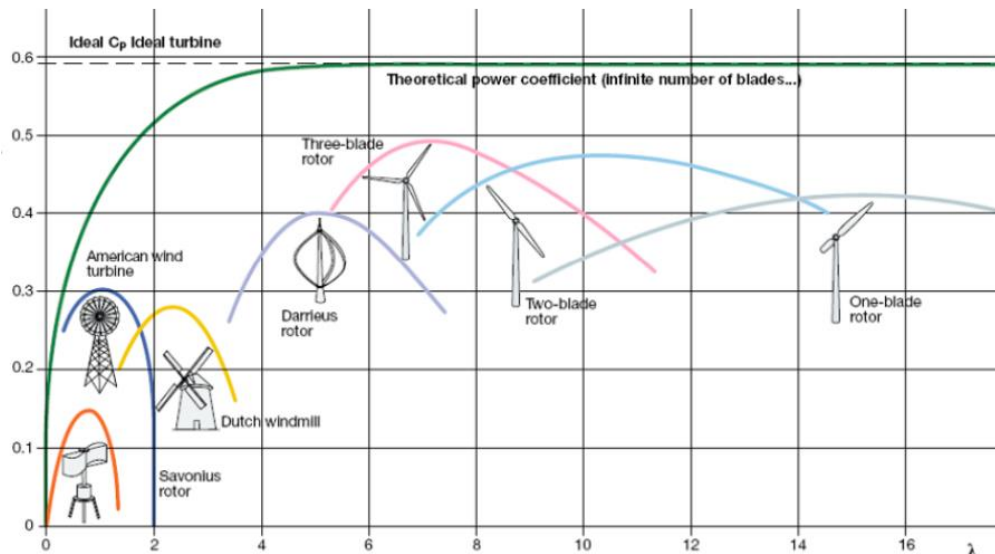
- ω la velocidad angular $\left[\frac{rad}{s}\right]$.
- R el radio de la turbina $[m]$.
- v la velocidad del caudal del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.

3.2.7 Las Curvas $C_p - \lambda$

Como se mencionó anteriormente, con una curva de coeficiente de potencia - razón de velocidad de punta, se puede observar el comportamiento de las turbinas, permitiendo comparar el comportamiento de cada tipo de turbina en una sola gráfica, como se muestra a continuación.

Figura 6.

Comparación de coeficientes de potencia entre diferentes tipos de turbinas eólicas, con el límite de Betz indicado.



Nota. Tomado de *Review of Recent Advances of Wind Energy* (p.3), por Qasim A. Alabdali, et al., 2020, Science and Education Publishing.

En el gráfico presentado se puede observar que el rotor Savonius logra alcanzar un valor de coeficiente de potencia máximo inferior que los demás rotores, pero con la diferencia de que el Savonius puede lograr un arranque sin asistencia externa y con menos tamaño, siendo importante también, para tener en cuenta, su diseño sencillo.

Esta curva es de gran importancia ya que, con ella, junto a la generada relacionando el coeficiente de momento con la razón de velocidad de punta ($C_m - \lambda$), se analizará el comportamiento de la turbina a la hora de simular, tanto en la validación como en la simulación propia.

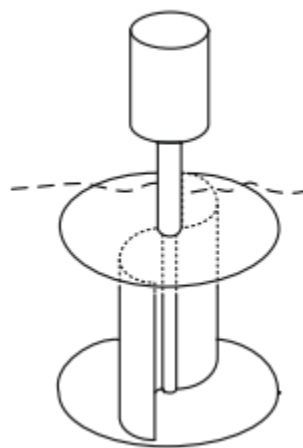
3.3 Turbina Savonius

Para el presente proyecto se ha escogido la turbina de rotor tipo Savonius. Este tipo de turbina tiene un eje vertical, y se usa para convertir la fuerza del fluido actuador en par, a fuerza rotacional.

Los rotores Savonius constituyen uno de los modelos de turbina más simples que se puede encontrar, pero cuentan con una gran eficiencia de transformación de energía a bajos caudales como se demostró anteriormente, además de no necesitar una gran infraestructura para su instalación y funcionamiento. Aunque históricamente no se han utilizado para fluidos densos como el agua (su uso se da principalmente con el aire), últimamente se han realizado estudios y modificaciones para aprovechar sus bajos costos y alto rendimiento en el campo hidrocínético.

Figura 7.

Ilustración de una turbina Savonius para trabajo con agua.

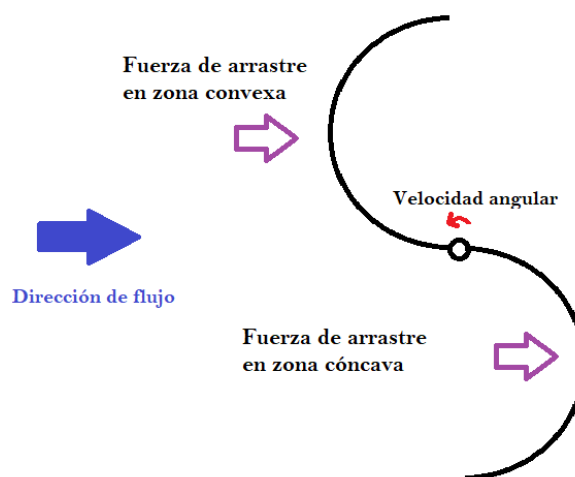


Nota. Tomado de *Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review* (p.1829), por M.J. Khan, et al., 2009. Elsevier.

Esta turbina fue desarrollada por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius, en 1922. Es pionera de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés: *Vertical Axis Wind Turbine*), lo cual explica el porqué de su diseño tan sencillo, consistiendo tan solo en dos superficies semicilíndricas que, desde la vista superior de la turbina, forman una “S”, siendo una superficie cóncava y la otra convexa, rotando alrededor de un eje que se encarga de transmitir la potencia y ahora, también adaptada como turbina hidrocínética. El fluido que incide en la turbina se pone en contacto tanto con la superficie cóncava como con la convexa, induciendo fuerzas de arrastre de diferentes magnitudes, pues incidirá más en la superficie cóncava, generando una diferencia de fuerzas de arrastre en la turbina que producirá el giro de esta a bajas velocidades, pero con un gran par motor gracias a la forma extruida de sus alas, lo que permite que esta turbina no necesite ningún tipo de impulso fuera de las fuerzas de arrastre para iniciar su movimiento, siendo esta una de sus principales ventajas.

Figura 8.

Esquema de una Turbina Savonius impulsada por aire, con las fuerzas de arrastre incidentes.



Como se mencionó anteriormente, lo que le da el movimiento al rotor Savonius es la diferencia de las fuerzas de arrastre que inciden en los lados cóncavo y convexo, lo cual indica que esta turbina hace parte de las turbinas de acción o arrastre, que aprovechan grandes saltos y, como en el caso de la Savonius, bajos caudales. El hecho de funcionar netamente por fuerzas de arrastre, no permite que las aspas de este tipo de turbina puedan girar más rápido que las corrientes que inciden en ellas, esto quiere decir que la razón de velocidad de punta (TSR) que tendrá esta turbina no podrá nunca superar a 1, debido a que las fuerzas de sustentación, que son las que permiten superar la unidad de TSR, son nulas en las turbinas Savonius, influyendo también en la eficiencia, que se ve reducida en comparación a rotores con perfiles alares definidos en su sección transversal.

En los últimos años, se han realizado estudios para encontrar alternativas más amigables con el medio ambiente y prácticas para la generación de energía, siendo que, en lugares como Latinoamérica y Europa ya se han observado los grandes daños ecológicos que causa la generación de energía hidráulica tradicional, pues se cuenta con una cantidad considerable de centrales hidroeléctricas, intentando aprovechar la gran oferta hídrica presente. Esta problemática ha dirigido las investigaciones a turbinas como la Savonius, pues su simplicidad de diseño, la facilidad para su mantenimiento, y su practicidad de instalación para casi cualquier cuerpo hídrico que cuente con un caudal normal y sin necesidad de grandes infraestructuras, convierte a este tipo de turbina en una potencial solución, y es la razón por la cual se seleccionó en este proyecto.

3.4 Dinámica de Fluidos Computacional

La dinámica de fluidos computacional, o CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics), es la rama de la física que trata sobre la simulación numérica de todo lo que

tiene que ver con flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados, como la combustión utilizando algoritmos y métodos numéricos aplicados a los tres principios de los fluidos: ley de conservación de masa, ley fundamental de la dinámica, y ley de la conservación de la energía (Blog ESSS, s.f.).

El CFD se originó gracias a la combinación de la mecánica de fluidos con los métodos numéricos, y hoy en día es una de las disciplinas que permite manejar problemas muy complicados, ya sea de mecánica de fluidos, transferencia de calor, termodinámica, etc., y obtener resultados claros y relativamente rápido, con la ayuda de unidades computacionales que se encargan de realizar todos los cálculos correspondientes.

En la dinámica de fluidos computacional existe una estructura para la solución de un problema que consta principalmente de tres partes fundamentales: El preprocesamiento, el procesamiento o solución, y el post-procesamiento.

3.4.1 Preprocesamiento

El preprocesamiento, para un usuario que no pretenda desarrollar su propio software, conlleva todo lo que tiene que ver con la construcción de la geometría que representaría el dominio físico del análisis que se desea hacer, haciendo posteriormente una discretización espacial de este, que consiste en dividir la geometría en volúmenes de control mediante un proceso de mallado y, también, se definen tanto las condiciones de frontera, como las ecuaciones y propiedades del fluido. Teniendo en cuenta a una persona que usa un software comercial, este proceso no representa tanto tiempo como para quien pretende desarrollar software.

3.4.2 Procesamiento

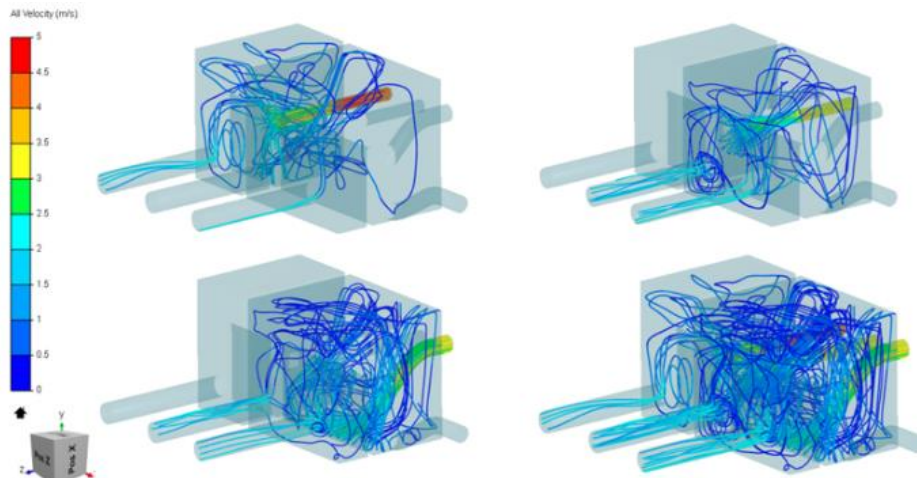
El procesamiento es la parte central de la estructura, es la razón por la cual se realiza el preprocesamiento, y la fuente de la información que se trabajará en el post-procesamiento. En esta etapa, el usuario da la orden para ejecutar el modelo de CFD planteado en la etapa anterior, para posteriormente esperar cierto tiempo, dependiendo del costo computacional del caso, para obtener los resultados que se usarán en la etapa final de la estructura de CFD.

3.4.3 Post-procesamiento

El post-procesamiento es la etapa del tratamiento y análisis de datos. Se le llama también la etapa visual, ya que el objetivo es ordenar los datos de forma que sea entendible fácilmente, pues en realidad los resultados entregados son una gran colección de datos correspondientes para cada time step definido y, dependiendo del software y lo que se le haya pedido, un video representando el fenómeno. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, el usuario puede aplicar diferentes técnicas de tratamiento y análisis de datos como el desarrollo de gráficos y tablas, y transformar esa solución numérica del CFD, en una solución más analítica. Generalmente se representan mallas numéricas, mapas de contornos, campos de velocidad, etc.

Figura 9.

Muestra de post-procesamiento: Aplicación de CFD para un tanque de paso.



Nota. Tomado de *Dinámica de fluidos computacional* [En línea], por David Calderón V.

<https://www.integral.com.co/dinamica-de-fluidos-computacional/>

3.4.4 Modelos de Turbulencia

En la dinámica de fluidos computacional se incluyen fenómenos fisicoquímicos involucrados con la mecánica de fluidos. Estos fenómenos son aquellos que involucran transferencia de masa, de cantidad de movimiento, de energía, etc., de una zona a otra con el transcurrir de cierto tiempo. Para lograr una correcta replicación de un fenómeno real dentro de la simulación, existen varios modelos, y entre ellos los principales son: DNS o Simulación Numérica Directa (Direct Numerical Simulation), LES o Simulación de Grandes Escalas (Large Eddy Simulation), y RANS o Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (Reynolds Average Navier-Stokes Equations).

- DNS: Este modelo, como al LES, es de resolución de las ecuaciones de Navier Stokes directamente. Este modelo discretiza directamente las ecuaciones instantáneas que gobiernan el movimiento del flujo, tanto laminar como turbulento, para posteriormente resolverlas numéricamente. En el proceso de discretización se resuelven las escalas espaciales y temporales del flujo, sin necesidad de implementar algún modelo fuera del mismo DNS. Este modelo generalmente se limita a flujos con número de Reynolds bajo, y geometría y dominios sencillos, pues a la hora de capturar todas las escalas de un flujo turbulento no reactivo, la cantidad de elementos para la discretización depende casi únicamente del Reynolds.

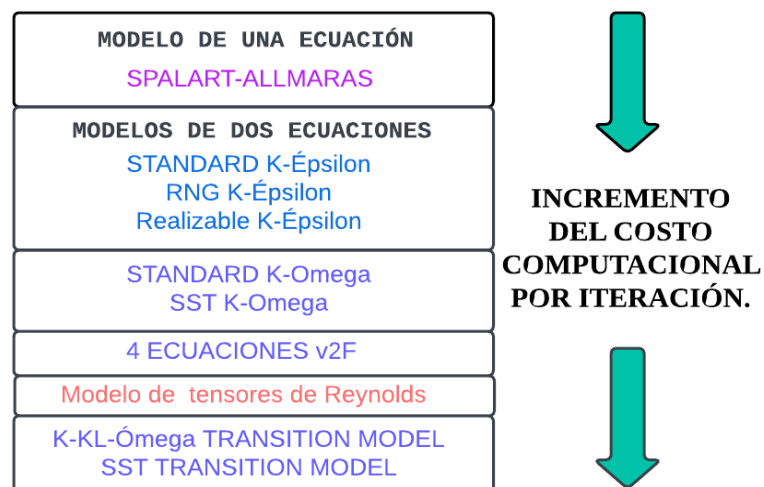
- LES: En este modelo se resuelven directamente las ecuaciones de Navier-Stokes. Lo que hace es darles prioridad a las escalas de mayor tamaño, ya que estas suelen ser más efectivas con el tratamiento de datos y tienen mayor capacidad de transporte que las que son más pequeñas, siendo estas más débiles y de menor capacidad. Se filtran las pequeñas escalas, mientras se modela la información que va por las escalas grandes. Esta técnica se usa para cálculos tridimensionales con efecto temporal, por lo que, aunque sea menos compleja que la DNS, cuesta más computacionalmente, pues los tiempos de simulación son más grandes dadas las exigencias numéricas.

- RANS: Este modelo, a diferencia de los anteriormente mencionados, no resuelve directamente las ecuaciones de Navier-Stokes, sino que realiza un promedio que luego necesita de aproximaciones y modelos auxiliares para su solución. Es el modelo de caracterización de menor exigencia computacional, pero también es el más utilizado en

casos prácticos industriales. Esta técnica aproxima de forma estadística las ecuaciones gobernantes para que las propiedades del fenómeno no cambien con el tiempo y sean determinadas por las condiciones de frontera, es decir, que sea un análisis estacionario. Para este modelo se promedian todas las escalas espaciales y temporales de las fluctuaciones turbulentas, y se resuelven las ecuaciones de transporte en términos de variables medias del sistema. Las ecuaciones tratadas por RANS requieren de modelos adicionales llamados modelos de turbulencia, pues presentan el problema de cierre que será tratado más adelante, al igual que los modelos de turbulencia complementarios para llegar a la solución. Los modelos de turbulencia para la metodología RANS se ilustran en la Figura 10.

Figura 10.

Ilustración gráfica de los diferentes modelos RANS, ordenados de menor a mayor gasto computacional.



Nota. Elaborado en el software Lucidchart.

- Para el modelo Spalart-Allmaras es un modelo de bajo costo que resuelve la ecuación de transporte para una viscosidad modificada, fue diseñada para aplicaciones aeroespaciales que implicaban flujos en paredes, suele dar resultados adecuados cuando se tiene gradientes de presiones contrarias. Sin embargo, presenta limitaciones importantes como no ser aplicable a fluidos más complejos, por otra parte, no puede predecir la caída de la homogeneidad del fluido asumiendo un fluido isentrópico.
- Continuando con los modelos de 2 ecuaciones se encuentra el modelo estándar K- ϵ . Es uno de los modelos de turbulencia más utilizado para la aplicación industrial, este contiene diferentes submodelos capaces de trabajar para diverso tipo y es fácilmente aplicable utilizando datos como pueden ser los flujos, sin embargo, así mismo contiene diversas limitaciones en aplicaciones como lo pueden ser grandes gradientes de presión o flujos con alta separación.
- El siguiente es el modelo Realizable K- ϵ (RNG). Este modelo puede predecir de forma adecuada la tasa de esparcimiento en chorros, también se desempeña mejor frente a el modelo estándar en fenómenos que impliquen rotación, condiciones de frontera con gradientes de presión inversa separación y recirculación.
- Para este modelo también existe otra versión RNG k- ϵ que se diferencian al derivar analíticamente utilizando la renormalización de teoría de grupos en lugar del modelo empírico de datos, por lo que suele desempeñarse mejor que SKE en la capa limite, la tasa de deformación, remolinos y separación
- El Estándar K- ω (SKW) es un modelo robusto basado en Bajos Números de Reynolds (LRN por sus siglas en inglés) en la capa viscosa, este modelo tiene

varios submodelos que permiten evaluar los efectos de la compresibilidad, los fluidos transitorios y el efecto de capa límite, suele ser muy utilizado en aplicaciones de turbomáquina y aeroespacial.

- Shear Stress Transport $K-\omega$. Este modelo mezcla la transición gradual del modelo SKW cerca de las paredes con una versión de Altos Números de Reynolds (High-Reynolds-Number) del modelo $K-\omega$ en la parte exterior de las fronteras, esta versión contiene una versión modificada de la viscosidad para los efectos de transporte especialmente en la capa límite. Tiene una gran precisión en grandes gradientes de presión
- Finalmente, el Reynolds Stress Model se deriva por promediar los productos de la fluctuación de la velocidad y las ecuaciones de Navier-Stokes. adicionalmente necesita una ecuación para la tasa de disipación de turbulencia. Tiene un gran costo computacional y de memoria, la convergencia de las ecuaciones suele ser bastante compleja, pero es confiable en sistemas de rotación o grandes curvaturas.

3.4.5 Mallado

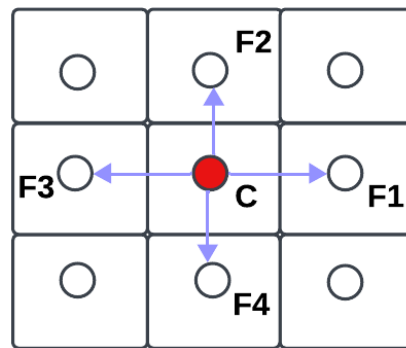
El mallado es la subdivisión del dominio en pequeñas celdas. Cada una de estas celdas, a la hora de la simulación, está encargada de hacer el cálculo del fenómeno que pase específicamente por su rango del dominio en el modelo de CFD. Esto hace parte del proceso de discretización y, aunque el Software implementado puede realizar un mallado automáticamente, es recomendable que el usuario construya su mallado en función de la complejidad del dominio, la exactitud de los datos esperados y el costo computacional aceptado. Por lo anterior, generalmente se hace un estudio de la independencia de los resultados respecto al mallado, que

busca encontrar el punto óptimo tanto de cantidad de celdas como de complejidad geométrica de ellas, para obtener mejores resultados en menor tiempo.

Durante la discretización, las ecuaciones diferenciales parciales están integradas en cada celda de la malla, resultando en un conjunto de ecuaciones algebraicas con cada una, conectando el valor de la variable en una celda con las variables en las vecinas (que hacen contacto).

Figura 11.

Conectividad entre celdas vecinas.



Nota. Elaborado en el software Lucidchart.

Las ecuaciones algebraicas son posteriormente agrupadas en matrices globales y vectores, y los coeficientes de cada ecuación se colocan en filas y columnas. Se le llama integración de ecuaciones en cada celda al ensamble local, mientras que la construcción de un sistema total de ecuaciones con la información del ensamble local se conoce como ensamble global. Mientras tanto, la discretización de las ecuaciones se deriva en términos de las celdas vecinas, y el conjunto de las ecuaciones en la matriz global tiene en cuenta los índices reales de estas celdas.

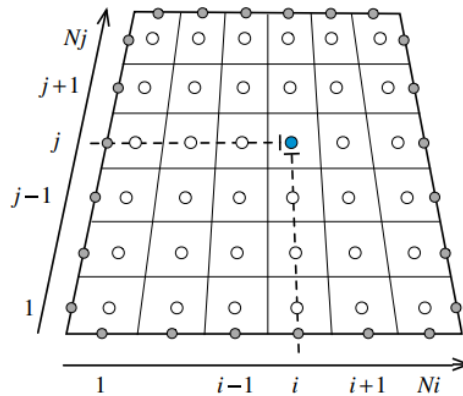
3.4.6 Tipos de Malla

Como se ha mencionado anteriormente, el mallado es la herramienta que se usa para discretizar un dominio. Este dominio se puede discretizar tanto con un mallado estructurado, como con un mallado no estructurado.

- Mallas estructuradas: para una malla estructurada regular, cada celda interior del dominio está conectada al mismo número de celdas vecinas, además de que cada vértice de la malla tiene un vecino isomorfo, exceptuando las zonas fronterizas. Estas celdas vecinas se pueden identificar con los índices “ i ”, “ j ” y “ k ” en las coordenadas “ x ”, “ y ” y “ z ”, respectivamente. Esto permite que este tipo de malla use una menor cantidad de memoria ya que la información topológica está integrada en la estructura de malla a través del sistema de indexación. Esto también conduce a una mayor eficiencia en la codificación, la utilización de la caché y la vectorización. Las cuadrículas estructuradas se utilizan ampliamente en el desarrollo de los métodos de volumen y elementos finitos

Figura 12.

Ilustración de una malla estructurada junto a sus índices locales y topología.

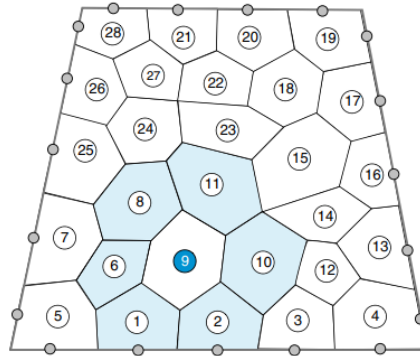


Nota. Tomado de *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics* (p.142), por F. Moukalled, et al., 2016, Springer.

- Mallas no estructuradas: Las mallas no estructuradas ofrecen mayor libertad a la hora de mallar un dominio, tanto en la cantidad de celdas que se pueden utilizar, como en dónde se puede concentrar la mayor cantidad de estas. Sin embargo, esta flexibilidad conlleva una complejidad adicional en el mallado. Las celdas de la malla no estructurada tienen diferente número de vecinos independientemente de si están en zona de frontera o no. Este tipo de malla se usa cuando se trabaja geometrías complejas, y también cuando se necesita extraer información de zonas muy puntuales del dominio, ya que se puede modificar la densidad de celdas en puntos específicos.

Figura 13.

Malla no estructurada, indexación global.



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

3.4.7 Reducción del Comportamiento del Flujo a Dos Dimensiones

En estos análisis de turbinas eólicas e hidrocinéticas con diseños simples, generalmente se emplea una reducción de tres a dos dimensiones, ya que los resultados de la simulación no cambian de forma considerable entre 3D y 2D. Esto se realiza principalmente por practicidad, pues claramente una simulación de tres dimensiones adquiere un costo computacional mayor que una de dos dimensiones, lo cual incurriría en grandes retrasos innecesarios en la investigación, pues se obtienen resultados acertados de forma más práctica con dominios 2D. Esta reducción se puede aplicar cuando el perfil de la turbina, respecto al eje de la profundidad, permanece constante, es decir, sin cambios geométricos que se superpongan en una representación 2D.

Para que una simulación bidimensional describa correctamente el flujo por la turbina, también se debe tener en cuenta los estudios realizados por Bianchini, et al. (2017) que concluyen que el tamaño del dominio es fundamental, pues si no es lo suficientemente grande, tiende a sufrir efectos de bloqueo artificiales que incidan negativamente en los resultados finales de la simulación, concluyendo que el dominio de una simulación 2D para este tipo de fenómenos debe ser de mayor tamaño respecto al correspondiente para una simulación 3D. Bianchini, *et al.*, recomiendan también el uso del modelo de turbulencia SST $k-\omega$, pues según ellos, tiene la capacidad de replicar la curva experimental de $C_p-\lambda$, gracias a la facilidad que tiene para calcular el flujo cercano a las paredes, así como de las zonas de frontera.

3.5 ANSYS Fluent

ANSYS Fluent es un software de CFD que se ha establecido como un estándar para los usuarios que desean simular fenómenos desde transferencia de calor, hasta flujos de cualquier tipo con geometrías complicadas. Este es probablemente el Software CFD de uso más intuitivo, además que permite realizar todas las fases de la dinámica de fluidos computacional: preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento, permitiendo modelar, mallar, simular y ver las interacciones multifísicas de la simulación, todo sin necesidad de acudir a programas externos.

3.6 Método de Discretización en CFD

El proceso de discretización es un procedimiento del método de volúmenes y elementos finitos que se implementa para obtener soluciones numéricas partiendo desde las ecuaciones que

gobiernan el dominio físico del fenómeno que se quiere analizar. Este procedimiento consta de 4 pasos:

- Paso I: Modelamiento geométrico y físico.

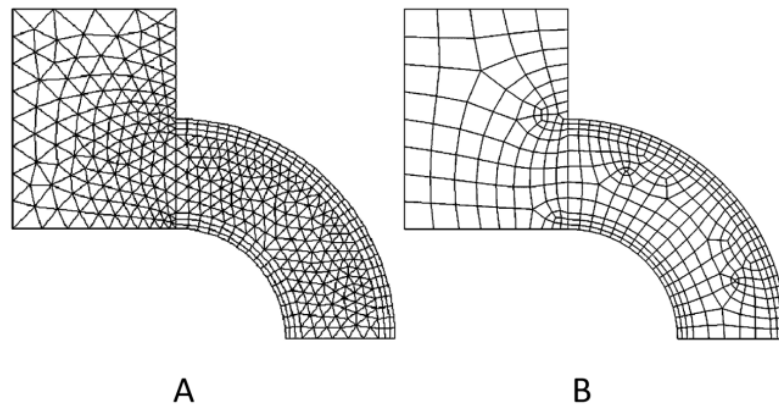
Este paso consiste en la realización de dos tipos de modelamiento, uno relacionado con la geometría del dominio físico, y otro relacionado con el fenómeno físico de interés, lo que culmina en la definición de las ecuaciones gobernantes del sistema dentro de un dominio computacional.

- Paso II: Discretización de dominio.

En este paso se hace la discretización geométrica del dominio físico, lo cual resulta en un mallado, donde las ecuaciones de conservación serán resueltas, eventualmente. Esto requiere la subdivisión del dominio en celdas discretas que cubran el dominio computacional por completo, formando un mallado. Este mallado puede tener varias formas, siendo las principales, las mostradas en la figura 14, donde el mallado triangular se usa en los dominios más complejos, gracias a su mayor capacidad de recolección de datos (al tener más celdas vecinas), mientras que el rectangular se usa para sistemas más simples, ya que en estos no se requiere la recopilación de muchos datos, reduciendo, con el mallado rectangular, el gasto computacional.

Figura 14.

Mallado triangular (A), y mallado rectangular (B).



Nota. Tomado de *Análisis CFD del sistema de climatización de un recinto* (p.20), por Francisco Carruncho Salgado, 2019, Universidad de la Coruña.

- Paso III: Discretización de ecuaciones.

En este paso, las ecuaciones gobernantes del sistema se transforman en un conjunto de ecuaciones algebraicas, una por cada celda del dominio computacional. Estas ecuaciones, luego, se juntan en una matriz de la forma $A[T]=b$, donde 'T' está definida al interior de cada celda de las fronteras del dominio computacional. Para la discretización de las ecuaciones, se usa el teorema de divergencia, que permite transformar una integral de volumen en una de superficie, para posteriormente ser transformada en una sumatoria de todas las celdas del dominio computacional, y así lograr la matriz mencionada.

- Paso IV: Solución de las ecuaciones discretizadas.

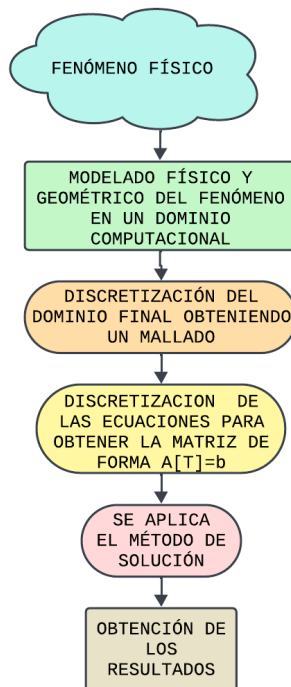
Una vez se obtienen las ecuaciones algebraicas discretas, se procede a usar métodos para obtener los valores discretos de T. Para esto, se puede usar tanto métodos directos como iterativos, de los cuales, los métodos iterativos son los comúnmente usados, ya que el

gasto computacional en los métodos directos es enorme y, aunque no se debe descartar la posibilidad de implementar estos, se recomienda usar principalmente los iterativos. Estos métodos iterativos consisten simplemente en un procedimiento de suponer y corregir, para gradualmente acercarse a la solución estimada, repitiendo el procedimiento de solución del sistema discreto de ecuaciones.

En la figura 15, se ilustra un diagrama de flujo que representa todo el proceso de discretización con más claridad.

Figura 15.

Representación gráfica del método de discretización.



Nota. Elaborado en el software Lucidchart.

4. Metodología

4.1 Descripción del Fenómeno

En este estudio se analizó el comportamiento de una turbina Savonius a la velocidad de 1 m/s inmersa en un canal de agua, la validación del sistema se da mediante la contrastación con datos experimentales en el estudio “*CFD-based improvement of Savonius type hydrokinetic turbine using optimized barrier at the low-speed flows*” (Alizadeh, H., et al.,2020), en el cual se utilizó una turbina Savonius compuesta de dos semicilindros con uno de avance y uno de retroceso, entre dos discos horizontales con una posición simétrica respecto al centro, la simulación se llevó a cabo tomando los parámetros experimentales como lo son el diseño de la turbina y los parámetros adimensionales como el coeficiente de momento, y el coeficiente de torque y la velocidad punta o TSR.

4.2 Modelo CFD

En cuanto al modelo computacional, se utilizó el software ANSYS, específicamente ANSYS Fluent. La resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes se llevó a cabo utilizando el modelo RANS para la turbulencia. Además, se empleó un método numérico semi-implícito (método Simple) para la solución de las ecuaciones, y se aplicó una discretización de segundo orden en el modelo. Así mismo las propiedades del fluido son variables con respecto al tiempo por lo que la simulación es transitoria, no obstante, la velocidad de este es constante durante y no se consideran fuerzas externas u otros fenómenos que puedan intervenir en el proceso.

Tabla 1.

Métodos de discretización de cada Solver.

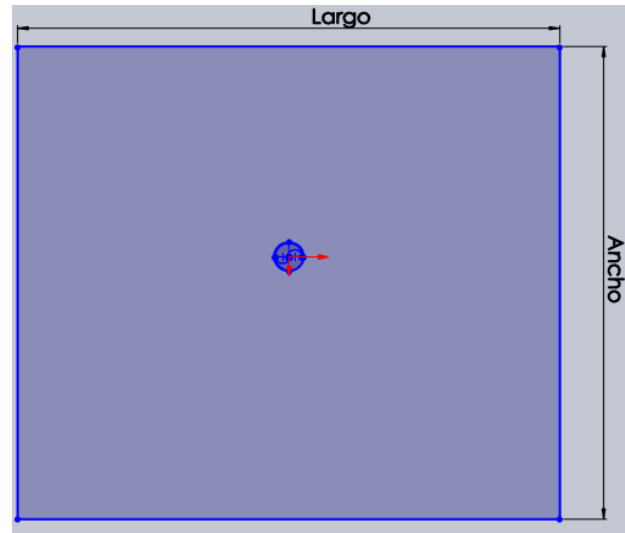
Solver	Métodos de discretización
Transient	Second Order discretización
Pressure Based	Least Squares Cell Based

4.3 Dominio y Geometría

El dominio computacional está dividido en dos partes que se separan mediante una interface, la primera zona es completamente estática y entra el fluido por la parte izquierda (Inlet), la parte derecha es por donde sale el fluido (outlet) finalmente el interior contiene la turbina que rota de forma constante. El dominio computacional fue creado usando Solid Works y posteriormente usando la herramienta de ANSYS Desing modeler, consta de un rectángulo de 20D y 24 veces de ancho, en la cual en su centro de origen se encuentra la turbina savonius, se ubica de esta forma para evitar que ocurran problemas de interferencias en el objeto de estudio.

Figura 16.

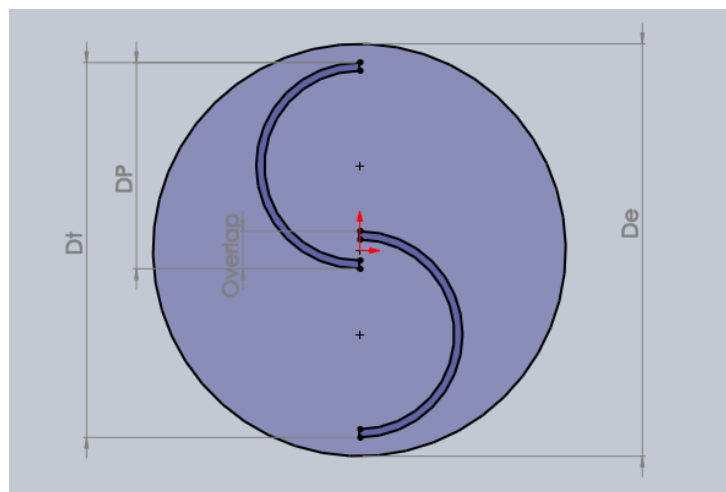
Vista superior de la turbina en el dominio. Las dimensiones se muestran en la Tabla 2.



Nota. Elaborado en SolidWorks.

Figura 17.

Vista específica de la turbina Savonius en el dominio, junto a sus dimensiones importantes, sus valores se muestran en la Tabla 2.



Nota. Elaborado en SolidWorks.

Las dimensiones tomadas para la turbina son las siguientes:

Tabla 2.

Dimensiones de modelación del dominio de la turbina.

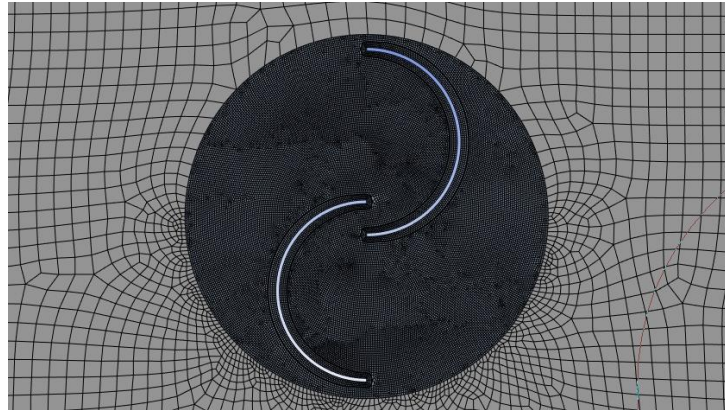
Parámetro	Valor
Ancho	20 d
Largo	24 d
Diámetro de Pala (Dp)	500 mm
Diámetro de Turbina (Dt)	909 mm
Diámetro Exterior (De)	1000 mm
Overlap (S/Dt)	0.1

4.4 Mallado del Modelo CFD

En el proceso de mallado se implementó ANSYS Meshing, donde se ha utilizado una malla estructural de triángulos y rectángulos contando con tres zonas refinadas de forma independiente. Está también la interfase, una zona interior y una zona exterior. En la zona interior se hizo especial énfasis utilizando la función “Inflation” para captar los datos de capa límite obteniendo mejores resultados.

Figura 18.

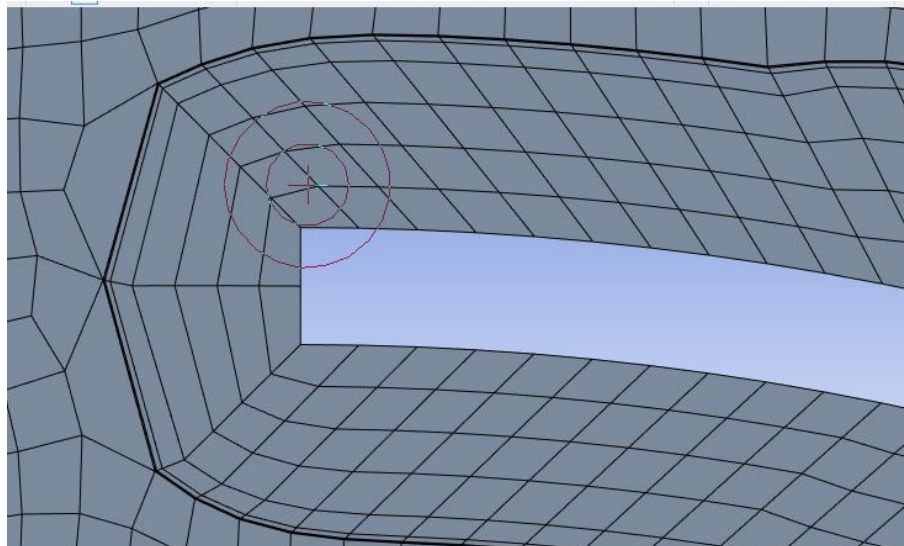
Mallado en la zona de la turbina Savonius.



Nota. Elaborado en ANSYS Meshing.

Figura 19.

Vista específica del mallado en la zona de contacto entre la pala de la turbina y el fluido.



Nota. Elaborado en ANSYS Meshing.

4.5 Ecuaciones Gobernantes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones gobernantes del comportamiento de cualquier fluido newtoniano. Una vez resueltas, estas ecuaciones brindan un campo de velocidad y de presión para el dominio del fenómeno analizado. Las Navier-Stokes expresan de forma matemática fenómenos como la conservación de momento y de masa, y están generalmente agrupadas de forma parcial y no lineal. No se dispone de una solución general para las Navier-Stokes y, sin ser posible hallar una solución analítica, excepto para contados casos específicos, las ecuaciones requieren de los diferentes análisis numéricos para llegar a soluciones aproximadas.

La ecuación de continuidad de flujo incompresible es:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes de conservación de momento para flujo incompresible en coordenadas cartesianas de orden “x”, “y”, y “z”, respectivamente, son:

$$\rho \cdot \left(\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + w \frac{\delta u}{\delta z} \right) = -\frac{\delta P}{\delta x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right)$$

(Ecuación 7)

$$\rho \cdot \left(\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + w \frac{\delta v}{\delta z} \right) = -\frac{\delta P}{\delta y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta z^2} \right)$$

(Ecuación 8)

$$\rho \cdot \left(\frac{\delta w}{\delta t} + u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right) = -\frac{\delta P}{\delta z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right)$$

(Ecuación 9)

Siendo u, v y w las componentes direccionales de “ x ”, “ y ” y “ z ” respectivamente, para su campo de velocidad del flujo: $V(x, y, z, t)$. P representa el campo de presiones: $P(x, y, z, t)$. Finalmente, el campo de fuerzas se ve representado por g_x, g_y , y g_z , y μ representa la viscosidad dinámica del fluido.

4.5.1 Algoritmo SIMPLE

El algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) es un algoritmo de solución para problemas de acoplamiento de presión-velocidad en flujos estacionarios. Este es esencialmente un procedimiento de estimar y corregir, y hace parte de los métodos de solución basados en la presión de ANSYS Fluent, junto a SIMPLEC, PISO y Coupled. Así como existen algoritmos basados en la presión, también existen los que están basados en la densidad, pero de estos no se profundizará, pues se usan para fluidos compresibles.

Lo que se hace en SIMPLE es derivar una ecuación para la Presión desde las ecuaciones de momento y continuidad de Navier – Stokes, y derivar a su vez un corrector para el campo de velocidades, en aras de satisfacer la ecuación de continuidad.

El primer paso, es expresar la ecuación general de momento en la forma general de una matriz:

$$\mathbf{M}U = -\nabla p \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde U es el campo de velocidades que en este punto es desconocido al igual que ∇p , que es el gradiente de presión. \mathbf{M} es una matriz de coeficientes conocidos que se obtienen de discretizar los términos de la ecuación, como ejemplo, se considera la componente “ x ” de la ecuación del momento:

$$\begin{pmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & M_{1,3} & \cdots & M_{1,n} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & M_{2,3} & \cdots & M_{2,n} \\ M_{3,1} & M_{3,2} & M_{3,3} & \cdots & M_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n,1} & M_{n,2} & M_{n,3} & \cdots & M_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\partial p / \partial x)_1 \\ (\partial p / \partial x)_2 \\ (\partial p / \partial x)_3 \\ \vdots \\ (\partial p / \partial x)_n \end{pmatrix}$$

Cada coeficiente $M_{i,j}$ es conocido.

El segundo paso, es separar la matriz de coeficientes mostrada, entre los componentes de la diagonal y los componentes que no están en la diagonal:

$$\mathbf{A}U - \mathbf{H} = -\nabla p \quad (\text{Ecuación 11})$$

En donde \mathbf{A} es la diagonal de la matriz de coeficientes, y \mathbf{H} es la matriz sin los coeficientes en diagonal. Como ejemplo, la matriz \mathbf{A} luce así:

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{2,2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & A_{3,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A_{n,n} \end{pmatrix}$$

Ya obtenida la matriz de diagonal \mathbf{A} , lo que sigue es obtener la \mathbf{A}^{-1} , o invertida, que es crucial para derivar las ecuaciones posteriormente. La matriz invertida es:

$$\begin{pmatrix} 1/A_{1,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/A_{2,2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1/A_{3,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1/A_{n,n} \end{pmatrix}$$

La matriz \mathbf{H} se puede obtener por medio de la siguiente relación:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}U - \mathbf{M}U \quad (\text{Ecuación 12})$$

Ahora se cuenta con las herramientas necesarias para derivar una ecuación para la presión. Este procedimiento inicia con el acomodamiento de la ecuación del momento de la siguiente forma:

$$U = A^{-1}H - A^{-1}\nabla p \quad (\text{Ecuación 13})$$

Posteriormente se sustituye en la ecuación de la continuidad, obteniendo:

$$\nabla[A^{-1}H - A^{-1}\nabla p]=0$$

Finalmente, reagrupando, se obtiene la ecuación de Poisson para la presión:

$$\nabla \cdot (A^{-1}\nabla p) = \nabla(A^{-1}H) \quad (\text{Ecuación 14})$$

Teniendo la ecuación de Poisson, junto a la ecuación de momento, se puede afirmar que tenemos un sistema equilibrado, contando con cuatro ecuaciones para cuatro incógnitas.

Ahora, lo que sigue es el proceso de solución que emplea el algoritmo SIMPLE. Este proceso es en realidad un bucle de 4 pasos:

- Paso 1: Se resuelven las ecuaciones de momento para el campo de velocidades haciendo uso de suposiciones para los valores de la matriz de coeficientes \mathbf{M} y el gradiente de presión ∇p . En este punto el campo de velocidades satisface las ecuaciones de momento, pero no la de continuidad.

$$MU = -\nabla p \quad (\text{Ecuación 10})$$

- Paso 2: Obtenido el valor del gradiente de velocidad con valores supuestos, se procede a resolver la ecuación de Poisson para obtener el campo de presiones.

$$\nabla \cdot (A^{-1}\nabla p) = \nabla(A^{-1}H) \quad (\text{Ecuación 14})$$

- Paso 3: Se usa el campo de presiones para corregir el campo de velocidades con el objetivo de que este satisfaga la ecuación de la continuidad.

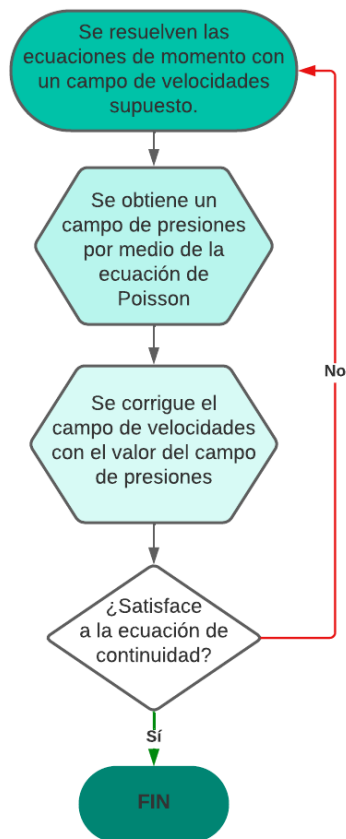
$$U = A^{-1}H - A^{-1}\nabla p \quad (\text{Ecuación 13})$$

- Paso 4: Ahora que el campo de velocidades corregido no satisface las ecuaciones de momento, hay que repetir el ciclo hasta satisfacer todas las ecuaciones.

Para mayor claridad, se presenta el algoritmo SIMPLE de forma gráfica como un diagrama de flujo a continuación:

Figura 20.

Diagrama de flujo del bucle del algoritmo SIMPLE.



Nota. Elaborado en el software Lucidchart.

El bucle presentado es solo un ejemplo de uno en su forma más básica, pero, por ejemplo, se pueden añadir más elementos como las ecuaciones de energía, de turbulencia y de transporte,

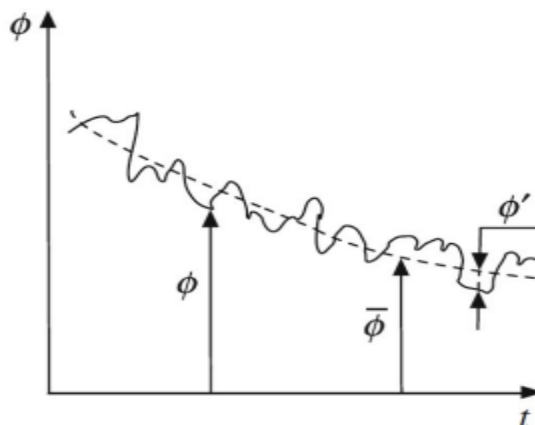
sea que se necesite dependiendo del caso. La forma de agregar cualquiera de estas ecuaciones al buble del algoritmo SIMPLE, es su introducción, luego corregir el campo de velocidades para satisfacer la ecuación de continuidad.

4.5.2 RANS

El modelo RANS, o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, son un conjunto de ecuaciones promediadas en el tiempo, logradas con la utilización de la técnica de descomposición planteada por Osbourne Reynolds, que busca descomponer una cantidad instantánea en sus cantidades promediadas en el tiempo y aleatorias o de carácter fluctuante. Esto se propone dado que un flujo turbulento tiene presencia de fluctuaciones continuas y variables, transformando los términos de las ecuaciones de Navier-Stokes en funciones aleatorias de tiempo y espacio. La descomposición de Reynolds se puede observar gráficamente en la Figura 21.

Figura 21.

Medida de una variable cualquiera con flujo turbulento en el tiempo.



Nota. Tomado de *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics* (p.86), por F. Moukalled, et al., 2016, Springer.

En este caso Φ representa una variable cualquiera, $\bar{\Phi}$ la variable promediada, y Φ' la variable fluctuante.

Siguiendo la lógica de la variable cualquiera, para el rango de tiempo T donde se realizó la medición, independientemente de ser de régimen turbulento, se puede obtener un valor promedio utilizando la siguiente integral.

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi dt \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde el componente promedio de la variable Φ está representado por $\bar{\Phi}$.

El componente fluctuante o aleatorio puede ser positivo o negativo, dependiendo de cómo se dispongan los ejes de referencia, y complementa la ecuación de equivalencia de la variable aleatoria con su disposición, quedando finalmente:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Este procedimiento se aplica para los campos de velocidad y presión en las ecuaciones de continuidad y conservación de momento, con el objetivo de describir el comportamiento de un fenómeno en estado turbulento, y una vez se realizan las correspondientes operaciones matemáticas, asumiendo las componentes de fuerza gravitacional g_i como cero, se obtienen las ecuaciones RANS, empezando por la de continuidad, seguidas por las tres de momento.

$$\frac{\delta \bar{u}}{\delta x} + \frac{\delta \bar{v}}{\delta y} + \frac{\delta \bar{w}}{\delta z} = 0 \quad \text{(Ecuación 17)}$$

$$\frac{\delta \bar{u}}{\delta t} + \frac{\delta \bar{u}\bar{u}}{\delta x} + \frac{\delta \bar{u}\bar{v}}{\delta y} + \frac{\delta \bar{u}\bar{w}}{\delta z} = -\frac{\delta \bar{P}}{\delta x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta z^2} \right) - \rho \left(\frac{\delta \bar{u}'\bar{u}'}{\delta x} + \frac{\delta \bar{u}'\bar{v}'}{\delta y} + \frac{\delta \bar{u}'\bar{w}'}{\delta z} \right)$$

$$\text{(Ecuación 18)}$$

$$\frac{\delta \bar{v}}{\delta t} + \frac{\delta \bar{v}\bar{u}}{\delta x} + \frac{\delta \bar{v}\bar{v}}{\delta y} + \frac{\delta \bar{v}\bar{w}}{\delta z} = -\frac{\delta \bar{P}}{\delta y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta z^2} \right) - \rho \left(\frac{\delta \bar{v}'\bar{u}'}{\delta x} + \frac{\delta \bar{v}'\bar{v}'}{\delta y} + \frac{\delta \bar{v}'\bar{w}'}{\delta z} \right)$$

(Ecuación 19)

$$\frac{\delta \bar{w}}{\delta t} + \frac{\delta \bar{w}\bar{u}}{\delta x} + \frac{\delta \bar{w}\bar{v}}{\delta y} + \frac{\delta \bar{w}\bar{w}}{\delta z} = -\frac{\delta \bar{P}}{\delta z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta z^2} \right) - \rho \left(\frac{\delta \bar{w}'\bar{u}'}{\delta x} + \frac{\delta \bar{w}'\bar{v}'}{\delta y} + \frac{\delta \bar{w}'\bar{w}'}{\delta z} \right)$$

(Ecuación 20)

Finalmente, se puede observar que cada variable quedó de forma promediada, fluctuante o combinada. También se observa que se obtuvieron los esfuerzos de Reynolds, que son los últimos tres términos de cada ecuación de momento. Estos esfuerzos son seis a pesar de ser nueve elementos en total, pues tres de ellos están repetidos. Los esfuerzos son $\bar{u}'\bar{u}'$, $\bar{v}'\bar{v}'$, $\bar{w}'\bar{w}'$, $\bar{u}'\bar{v}'$, $\bar{u}'\bar{w}'$ y $\bar{v}'\bar{w}'$, y representan unidades de fuerza sobre área cuando están multiplicados por la densidad.

4.5.3 Problema de Cierre

Como se mencionó anteriormente, el modelo RANS, o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, es un modelo que no resuelve directamente las ecuaciones mencionadas, sino que se apoya de análisis numéricos externos. Observando la deducción de las ecuaciones RANS, se puede concluir que existen cuatro ecuaciones para resolver diez incógnitas, siendo a primera vista imposible de solucionar. A este problema se le conoce como el problema de cerradura, o problema de cierre las ecuaciones RANS, y se puede solucionar de varias formas, siendo la hipótesis de Boussinesq y el modelamiento de los tensores de Reynolds, los métodos más usados.

Aunque el método de modelamiento de los tensores de Reynolds brinda resultados más precisos a la hora de analizar los efectos de las turbulencias en los fluidos, este requiere mucho gasto computacional, así que no es muy usado. Para los intereses de la presente investigación, se hablará de la hipótesis de Boussinesq, ya que los modelos complementarios del RANS son derivados de esta, siendo una opción ligera y con resultados aceptables.

La aproximación por la hipótesis de Boussinesq se trata de la inclusión de dos términos: la viscosidad de turbulencia μ_T y la energía cinética turbulenta k , para relacionarlo con los esfuerzos de Reynolds, y para esto, los esfuerzos se deben escribir en forma de tensor, como sigue:

$$\tau_{ij} = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix}$$

Donde τ_{ij} es el tensor de esfuerzos de Reynolds. Finalmente, para cumplir con la relación mencionada, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = 2\mu_T \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\delta u_k}{\delta x_k} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

4.5.4 Modelo SST $k - \omega$

El modelo SST $k - \omega$ es una variante del estándar $k - \omega$. Este modelo se caracteriza por su capacidad para analizar flujos tanto alejados de paredes como cercanos a ellas, también, es recomendado para los fluidos bajo la influencia de esfuerzos cortantes. Así como el modelo estándar, este ofrece un buen análisis para flujos a bajos números de Reynolds.

El SST $k - \omega$ fue creado por Florian Menter, pretendiendo encontrar la forma de describir un flujo de régimen turbulento, tanto para el flujo por paredes como en flujos libres,

usando la ya mencionada k , representando la energía cinética turbulenta, junto a ω , representando la razón de disipación de la energía cinética. El modelo consiste en las ecuaciones:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \beta^* \rho \omega k \quad \text{(Ecuación 22)}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + (2 - 2F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\delta k}{\delta x_j} \frac{\delta \omega}{\delta x_j}$$

(Ecuación 23)

Los valores constantes en el modelo SST $k - \omega$ son:

$$\sigma_{k,1} = 0.85, \quad \sigma_{k,2} = 1, \quad \beta^* = 0.09, \quad \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w,1} k^2}{\sqrt{\beta^*}}, \quad \sigma_{w,1} = 0.5$$

$$\sigma_{w,2} = 0.856, \quad k = 0.41, \quad \beta_1 = 0.075, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w,2} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

El valor F para el modelo son funciones de aproximación al fluido supeditado a la distancia hacia las paredes, se representa con las expresiones:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4) \quad \text{(Ecuación 24)}$$

$$\text{arg}_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{w,2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad \text{(Ecuación 25)}$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\delta k}{\delta x_j} \frac{\delta \omega}{\delta x_j}, 10^{-20} \right) \quad \text{(Ecuación 26)}$$

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2) \quad \text{(Ecuación 27)}$$

$$\text{arg}_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right) \quad \text{(Ecuación 28)}$$

Finalmente, el puente que une al modelo SST $k - \omega$ con las ecuaciones RANS es el término P, que representa la generación de energía cinética en la turbulencia, como se muestra a continuación:

$$P = \tau_{ij} \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \quad \text{(Ecuación 29)}$$

Se puede notar que se logra relacionar el valor P con el tensor de esfuerzos de Reynolds en la hipótesis de Boussinesq, que a su vez está relacionado con las ecuaciones RANS por medio de los esfuerzos de Reynolds. Esto quiere decir que finalmente se cuenta con las expresiones suficientes para obtener satisfactoriamente una aproximación al comportamiento de un flujo turbulento, siendo posible una solución numérica

4.6 Modelación y Simulación

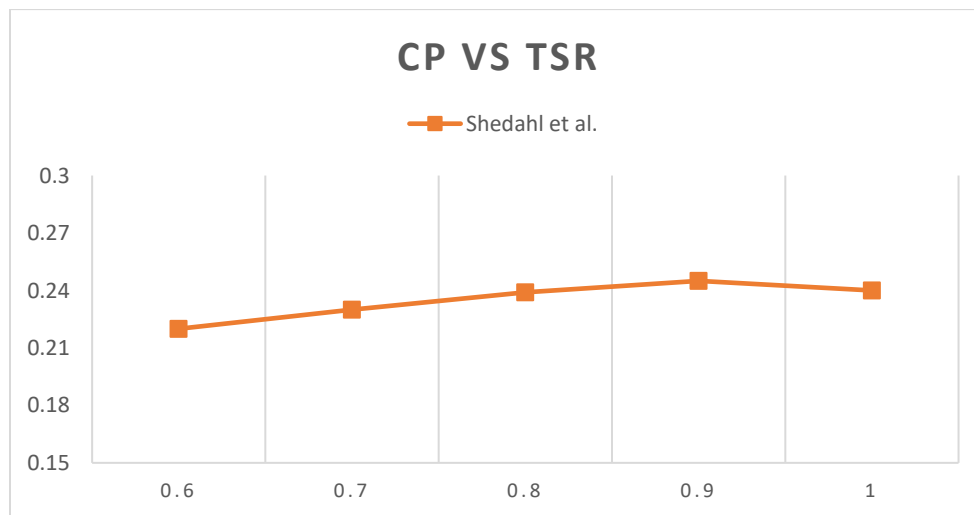
4.6.1 Validación y Verificación del Modelo

La validación del modelo CFD de la turbina Savonius para aplicaciones hidrocinéticas se hizo con los datos experimentales presentados por Shedahl, et al., (1978). En este artículo se construyeron las curvas de comportamiento de manera experimental tanto de rotores Savonius de dos palas, como de rotores con tres palas llegando a diferentes resultados ya que los autores variaron el “Gap width ratio” u “Overlap ratio” (*) de ambos rotores desde 0 hasta 0.2, siendo utilizados en el presente proyecto los resultados para 0.1.

(*) “Gap Width Ratio”, “Overlap Ratio” y en español: “Relación de traslape”, equivale a la división entre la distancia que separa a las palas y el diámetro total de la turbina: $\frac{s}{D}$.

Figura 22.

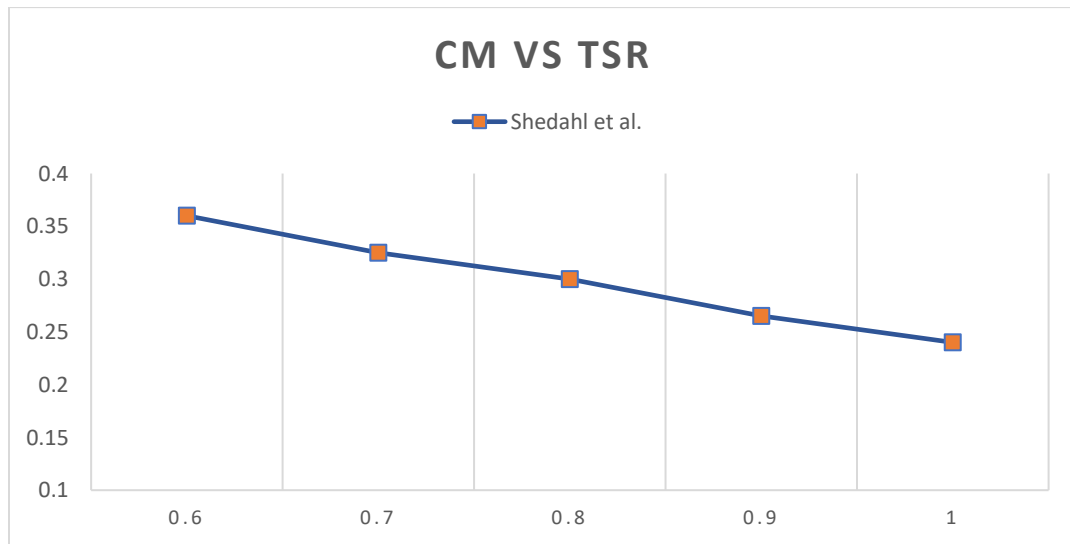
Datos experimentales de coeficiente de potencia en el rango de 0.6 a 1 TSR usados para la validación del modelo.



Nota. Los datos de esta gráfica fueron tomados la figura 15 de *Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors* (p.44), por Robert Sheldahl, et al., 1978, *Journal of Energy*.

Figura 23.

Datos experimentales de coeficiente de momento en el rango de 0.6 a 1 TSR utilizados para la validación del modelo.

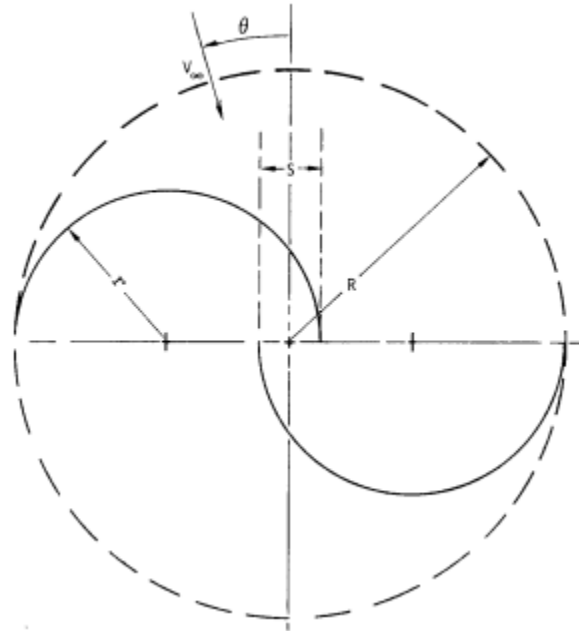


Nota. Los datos de esta gráfica fueron tomados la figura 15 de *Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors* (p.45), por Robert Sheldahl, et al., 1978, *Journal of Energy*.

La validación realizada por Idrissi, et al. (2022) con los datos experimentales ya mencionados se tomó como referencia para la del presente modelo. Ellos proponen el uso del modelo de turbulencia SST $k-\omega$ para lograr un acercamiento más exacto a los resultados de Sheldahl, *et al.*, realizando un dominio de una turbina 3D, pero adaptado a dos dimensiones, como el esquema presentado por Sheldahl en 1978.

Figura 24.

Esquema 2D del rotor con dos palas utilizado para la obtención de los resultados experimentales.



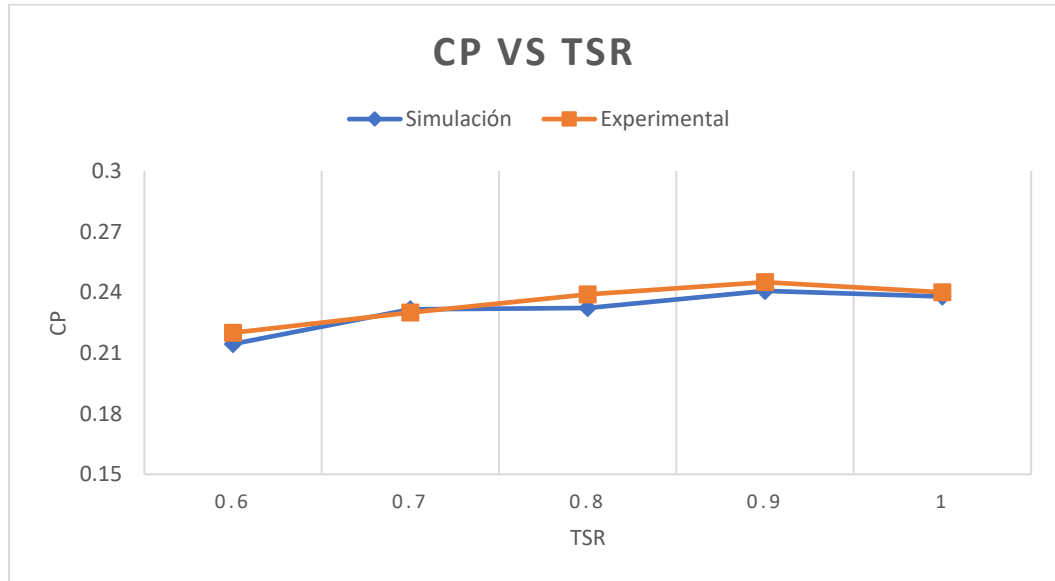
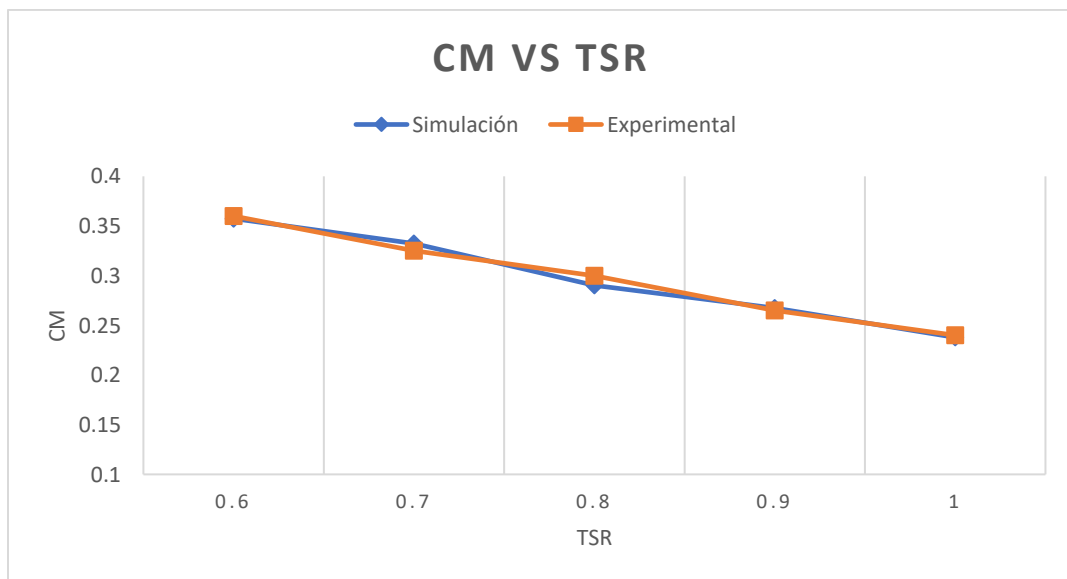
Nota. Tomado de *Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors* (p.21), por Robert Sheldahl, et al., 1978, Journal of Energy.

La simulación de Idrissi, *et al.* presenta un esquema equivalente para un “Overlap ratio” de 0.1, obteniendo resultados que según los mismos autores no sobrepasan el 5% de porcentaje de error con respecto a los valores experimentales.

Con esta información como guía, se realizó la validación correspondiente a la presente investigación, dando los resultados mostrados en las figuras 15 y 16.

Figura 25.

Resultados de la validación para coeficiente de potencia.

**Figura 26.** *Resultados de la validación para coeficiente de momento.*

La validación se realizó en el rango de 0.6 a 1 TSR ya que dentro de este se encuentra el punto óptimo de funcionamiento de la turbina, además que tiene una amplitud suficiente para demostrar que los resultados representan de forma adecuada a la curva de comportamiento.

Los resultados obtenidos en la simulación no superan el 4% de error respecto a los datos experimentales, lo cual indica que la simulación representa muy bien al fenómeno, dando como resultado una validación exitosa.

Tabla 3.

Tabla comparativa de los resultados de la simulación con los datos experimentales.

DATOS EXPERIMENTALES					
Cp experimental	Cp simulación	ERROR	Cm experimental	Cm simulación	ERROR
0.22	0.214451144	-2.52%	0.36	0.357418573	-0.72%
0.23	0.231540462	0.67%	0.325	0.332247131	2.23%
0.239	0.232190527	-2.85%	0.3	0.290238158	-3.25%
0.245	0.240698691	-1.76%	0.265	0.26744299	0.92%
0.24	0.23784314	-0.90%	0.24	0.23784314	-0.90%

Para finalizar, los resultados fueron verificados con los obtenidos por autores que de igual forma utilizaron la experimentación de Sheldahl, *et al.*, comparando los puntos de TSR 0.6 y 1 del coeficiente de potencia.

Tabla 4.

Comparación entre los resultados para TSR 0.6 y TSR 1 con los datos de otros estudios.

Fuente de datos.	TSR= 0.6		TSR= 1	
	Cp	Diferencia	Cp	Diferencia
Autores.	0.2144	--	0.2378	--
Idrissi, et al.	0.2178	1.59%	0.243	2.19%
Fatahian, et al.	0.2184	1.87%	0.2504	5.30%
Alizadeh, et al.	0.2183	1.82%	0.242	1.77%
Nimvari, et al.	0.218	1.68%	0.249	4.71%

Gracias a los resultados, tanto de los porcentajes de error de la validación con respecto a los datos experimentales, como de las diferencias con respecto a otros estudios, se puede concluir que el proceso de validación se realizó de forma satisfactoria.

4.6.3 Independencia de Malla y Tiempo

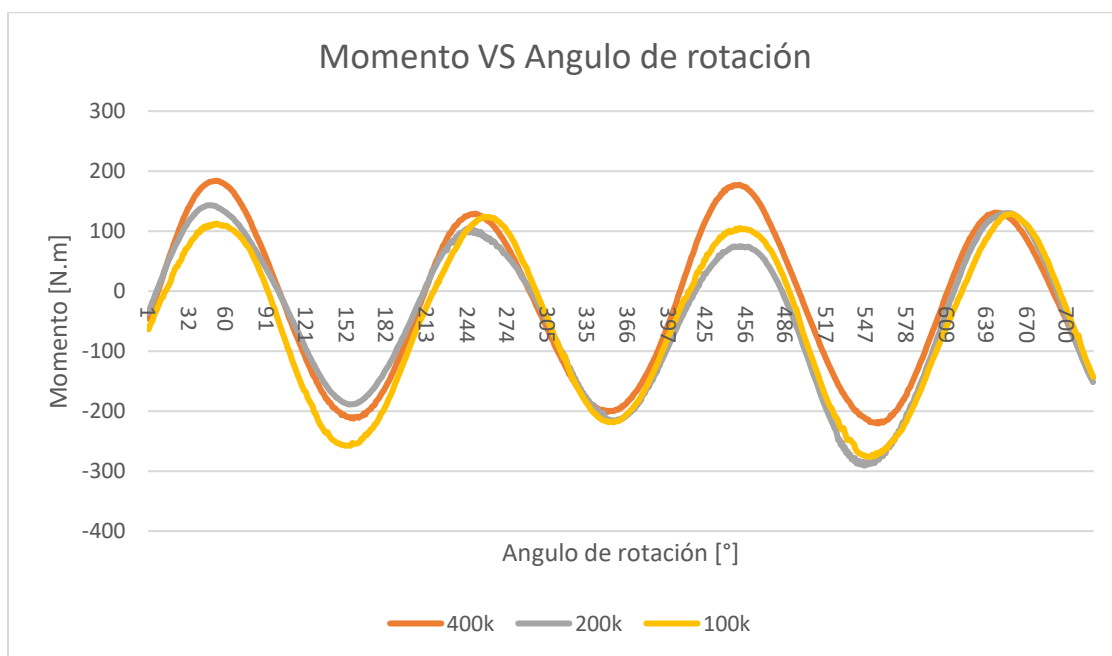
Para garantizar la obtención de los resultados más acertados posibles, se realizaron las pruebas de independencia de malla y tiempo, estos dos análisis permiten determinar las mejores condiciones para parámetros claves en la simulación: en el caso de la independencia de malla, se usó para definir el número de elementos, y en el caso de la independencia del tiempo, se usó para definir tanto el número de time steps, como el tamaño de cada uno de ellos.

Hablando de la independencia de malla, para su realización se usaron tres diferentes mallas, una de 100.000 elementos, otra de 200.000 elementos, y una última de 400.000 elementos. Para este análisis, se simuló la turbina a TSR igual a uno, haciéndola girar lo

necesario hasta donde la gráfica de momento vs time step lograra estabilizarse en dos vueltas, es decir, donde las oscilaciones presenten valores en sus oscilaciones bastante parecidos entre ellos. Finalmente, los resultados se muestran en la Figura 27.

Figura 27.

Comparación de los resultados para 2 giros de la turbina con las diferentes mallas en prueba.



Se pueden observar grandes diferencias entre la malla de 400.000 elementos respecto a las demás, además que la de 100.000 y 200.000 brindan valores muy cercanos entre ellas. Generalmente se sabe que una malla con más elementos tiene la capacidad de brindar resultados más acertados que mallas menos densas, pero esto conlleva un costo computacional mayor. En este caso, al ser empleada únicamente la versión para estudiantes que ofrece ANSYS, se podía llegar a un límite de 512.000 elementos, lo cual no representa un gran costo computacional, y mucho menos para un dominio cuya geometría no es especialmente complicada. Dicho lo

anterior, se puede observar que la malla de 400.000 elementos es la que da resultados notoriamente más precisos, encontrándose en un límite de tiempo de simulación aceptable para las unidades computacionales usadas, siendo que, si se aumentan los elementos al límite ofrecido por ANSYS Student, ya el tiempo de simulación sería notoriamente mayor, y aunque más exacto, la diferencia no sería suficiente para justificar su uso. A continuación, se comparan los resultados de las mallas de 100.000 y 200.000 elementos respecto a los resultados obtenidos con la malla de 400.000 elementos.

Tabla 5.

Comparación de los resultados de TSR 1 entre las diferentes mallas probadas.

Malla de 400.000	
Valor de ambos coeficientes	
0.128059861	
Malla de 200.000	
Valor de ambos coeficientes	Error respecto a la malla de 400.000
0.289352262	125.951%
Malla de 100.000	
Valor de ambos coeficientes	Error respecto a la malla de 400.000
0.349327043	172.784%

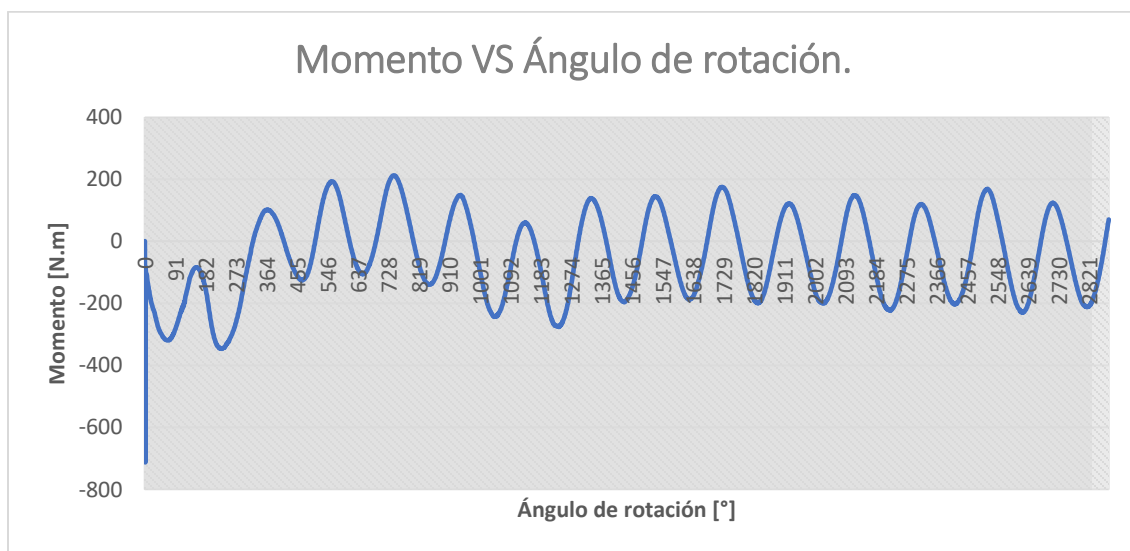
Numéricamente se evidencia lo mencionado anteriormente, pues la diferencia es muy amplia entre la celda más densa y las dos con menos elementos. Este resultado de cierta forma es esperado, pues se escogió el número de elementos de forma exponencial, para exponer más la diferencia entre las mallas.

Para el caso de la independencia del tiempo se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de independencia de malla, pues fue la malla de 400.000 elementos la implementada. En este estudio de independencia del tiempo se realizan dos análisis específicos, el primero es el de convergencia de la simulación y el segundo es el del tamaño de time step.

Para el análisis de convergencia, se tomaron datos de una simulación con un time step equivalente a un grado de rotación, definida para 8 vueltas de la turbina, con un TSR equivalente a 1, obteniendo la gráfica que se muestra a continuación:

Figura 28.

Curva de Momento VS Ángulo de rotación para la simulación de la turbina a 8 vueltas.



Se puede observar que la zona de estabilización se extiende hasta más o menos la cuarta vuelta de la turbina, y en la mitad derecha de la gráfica se encuentra ya estabilizada, siendo esta la zona de donde se extraerán los datos, pues esta estabilización de la gráfica representa la zona de convergencia, donde la simulación comienza a generar datos acertados. Finalmente, se decide realizar simulaciones a 10 vueltas, y extraer datos de las últimas dos vueltas, para trabajar con los

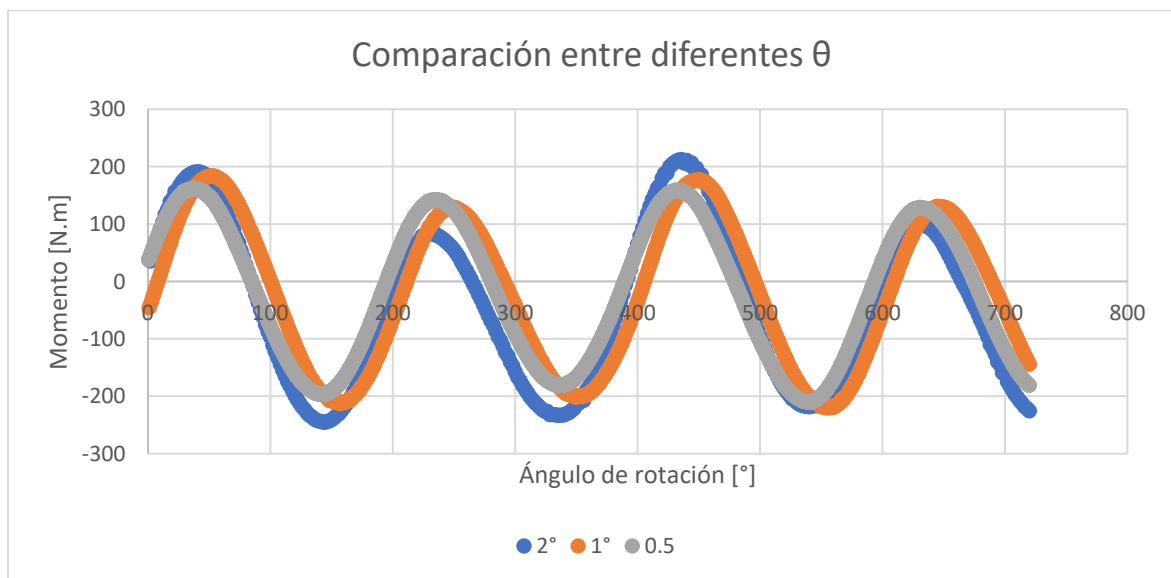
valores presentes de lleno en la zona de convergencia y darles seguridad a los resultados tomando dos vueltas en lugar de una.

Para el segundo análisis de independencia del tiempo, se plantean tres diferentes tamaños de time step, considerando los tamaños para $\theta=0.5^\circ$, 1° y 2° . Esto se hace con el objetivo de determinar qué tamaño de time step logra dar resultados más precisos. El término θ representa el valor del ángulo de rotación asignado para un time step, y se relaciona con el tamaño de este mediante la siguiente relación:

$$\text{Tamaño de time step} = \frac{\theta}{\omega \frac{180}{\pi}} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Figura 29.

Gráfica comparativa de los resultados obtenidos para diferentes θ .



Las curvas en la gráfica muestran una gran coincidencia entre los valores para $\theta=1^\circ$ y 0.5° , mientras que el valor para $\theta=2^\circ$ se muestra muy alejado, y sus picos tienen rangos muy alejados entre ellos. Esto indica que los datos más exactos están entre 1° y 0.5° , y teniendo en cuenta la

facilidad para el tratamiento de datos que se obtiene con 1° , pues los time steps equivaldrían cada uno a un grado de rotación de la turbina, y también teniendo en cuenta el tiempo de simulación, que para 0.5° es ligeramente mayor, se escoge finalmente trabajar el tamaño de time step dado para $\theta=1^\circ$, que equivale a 0.007932521 segundos.

4.6.4 Esquemas Numéricos.

Finalmente, para darle paso a los resultados, en la Tabla 6 se resume las especificaciones mencionadas de la simulación.

Tabla 6.

Esquemas numéricos generales de entrada para las simulaciones.

Número de celdas en la malla	400
Time step	0.013-0.008 (TSR 0.6-1), con $\theta=1$
Iteraciones por time step	20
Métodos de solución	Solver: Pressure based, Transient. Algoritmo: Simple. Métodos de discretización: Least Squared Based para gradientes y Second order upwind discretization para ecuaciones.
Controles de solución	Factores "Under-Relaxation": Presión 0.3 y Momento 0.4
Modelo rotacional	Sliding Mesh Model
Modelo de turbulencia	SST k- ω
Condiciones de frontera	Velocidad de Inlet: 1 m/s Velocidad angular: 1.3 - 2.2 rad/s Material del rotor: Aluminio Fluido: Agua
Criterio de convergencia	10^{-4}

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con las simulaciones y tratamientos de datos realizados para la presente investigación, vale recordar que las condiciones impuestas a la simulación son de una turbina Savonius de aluminio bajo la influencia de un flujo de agua de 1 m/s, considerada por los autores una velocidad promedio de un río en Colombia, siendo esta turbina probada para el rango de TSR entre 0.6 y 1, corriendo una simulación por cada TSR. Los resultados obtenidos se presentan en tres formas principales: las curvas de comportamiento características de los rotores Savonius (Coeficiente de potencia y de momento vs TSR) que confirman la veracidad de las simulaciones realizadas; se presentan también en la estructura del flujo, donde se puede observar el comportamiento del flujo y sus componentes principales como la presión y la velocidad, cuando el rotor está en funcionamiento, esto se presenta por medio de imágenes de la simulación con campos de flujo; finalmente, se presenta un análisis del potencial energético, para ilustrar los números reales de potencia que indican capacidad de generación de la turbina tratada.

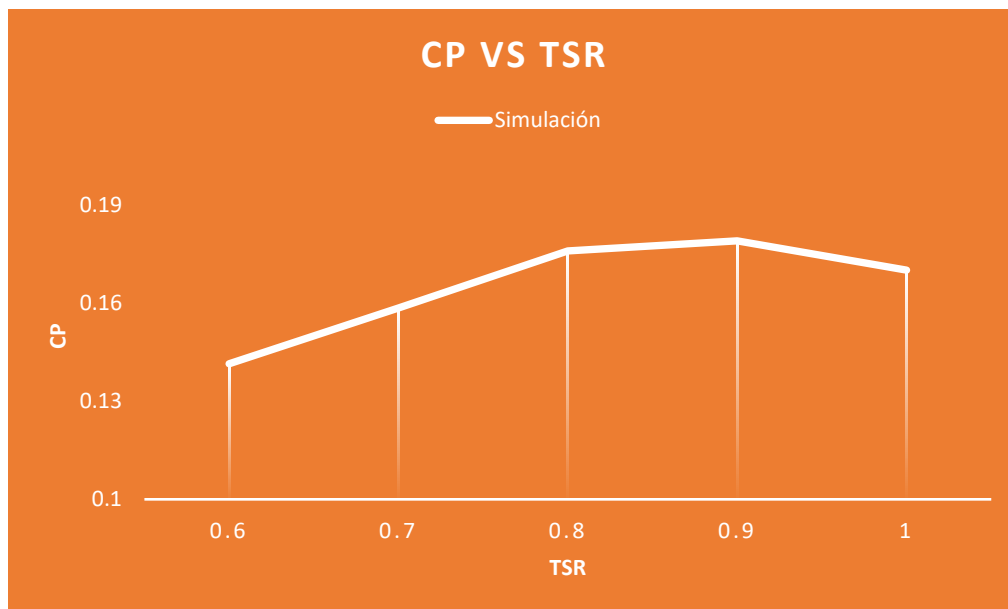
5.1 Curvas de Comportamiento

Las Figuras 30 y 31 representan las curvas de comportamiento características de la turbina Savonius, obtenidas utilizando la herramienta de CFD ANSYS Fluent. Estas curvas son esenciales ya que son quienes definen si las simulaciones describen correctamente el comportamiento del coeficiente de potencia y de momento bajo el efecto de la variación del TSR. El comportamiento de estas curvas es conocido, y para corroborar que las simulaciones

fueron válidas, las curvas deben seguir el comportamiento* que se presentó anteriormente con los datos experimentales mostrados en las Figuras 22 y 23 del capítulo 5 y, aunque estas curvas en realidad abarcan más puntos de estudio, se escogieron 5 puntos del rango entre 0.6 y 1 TSR para su evaluación, pues estos puntos son suficientes para describir la correcta replicación de la curva, además que dentro ese rango se encuentra los valores de potencia más altos generalmente, así que se estaría evaluando el punto óptimo de funcionamiento del rotor al mismo tiempo. Las curvas obtenidas fueron:

Figura 30.

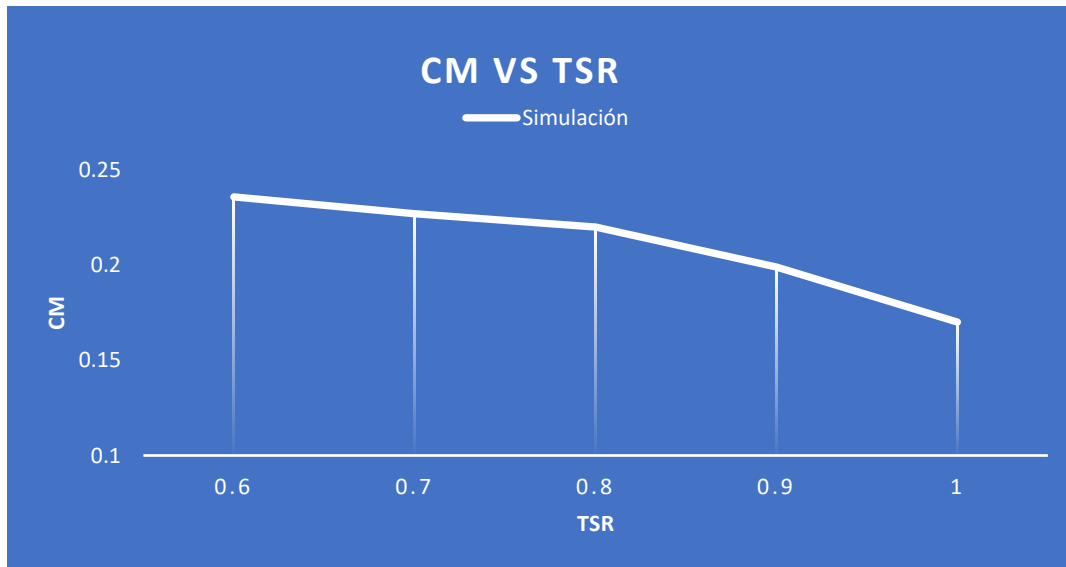
Curva de comportamiento C_p Vs Tip Speed Ratio para la turbina Savonius en agua.



* Cuando se habla de comportamiento, se refiere a la forma de la curva, no a que todas las curvas tengan los mismos valores.

Figura 31.

Curva de comportamiento C_m Vs Tip Speed Ratio para la turbina Savonius en agua.



Como se puede observar en las figuras mostradas, los coeficientes siguen perfectamente el comportamiento característico de las curvas de comportamiento de las turbinas Savonius, demostrando así que las simulaciones hechas si tienen una aproximación considerable a un fenómeno real bajo las mismas condiciones. Se observa también que el rango óptimo de funcionamiento se encuentra entre TSR 0.8 y 1, que es donde los valores de coeficiente de potencia son mayores (obteniendo su punto máximo en TSR 0.9) donde, por consiguiente, se lograría mayor generación de energía eléctrica.

Comparando los valores del rotor Savonius hidrocínético con el eólico presentado en la validación, es notorio que se sufre de una pérdida de coeficiente de potencia y momento. Esta pérdida es explicada directamente por el cambio de las condiciones de frontera, pues se pasó de un fluido ligero pero que entraba con velocidad de 7 m/s, a uno mucho más denso con una velocidad de entrada de 1 m/s. Hay que recordar que las turbinas hidrocínéticas aprovechan

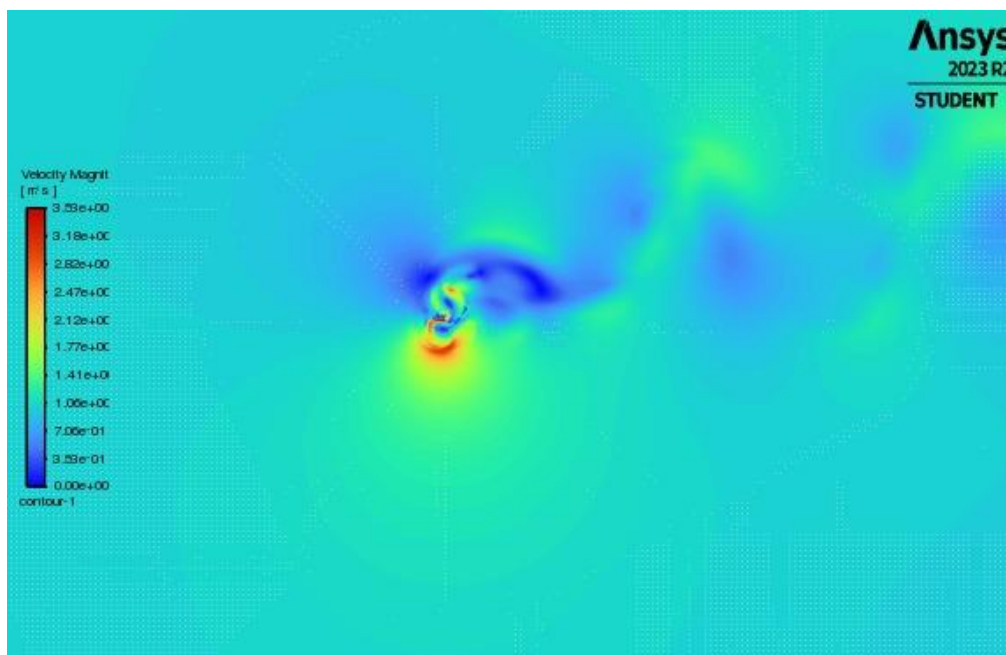
netamente la energía existente en el fluido por la velocidad que este lleva, y que la turbina Savonius es una turbina de arrastre, pues la pérdida de coeficiente de potencia en realidad no es grave, pues la diferencia entre fluidos para TSR 1, por ejemplo, es solo de aproximadamente 0.07, cuando se disminuyó la velocidad de entrada 7 veces, esto se debe a que un fluido más denso como el agua, tiene una capacidad de arrastre mayor a un fluido ligero como el aire, conservando buena parte del coeficiente de potencia y momento.

5.2 Estructura del Flujo.

A continuación, se presentan los contornos de velocidad y presión estática, con el fin de hacer más claro el entendimiento del fenómeno al lector. Las especificaciones de los contornos mostrados en las figuras 32 y 33 son: agua a 1 m/s en TSR de 0,9, escogiéndose ese punto porque es el de mayor generación.

Figura 32.

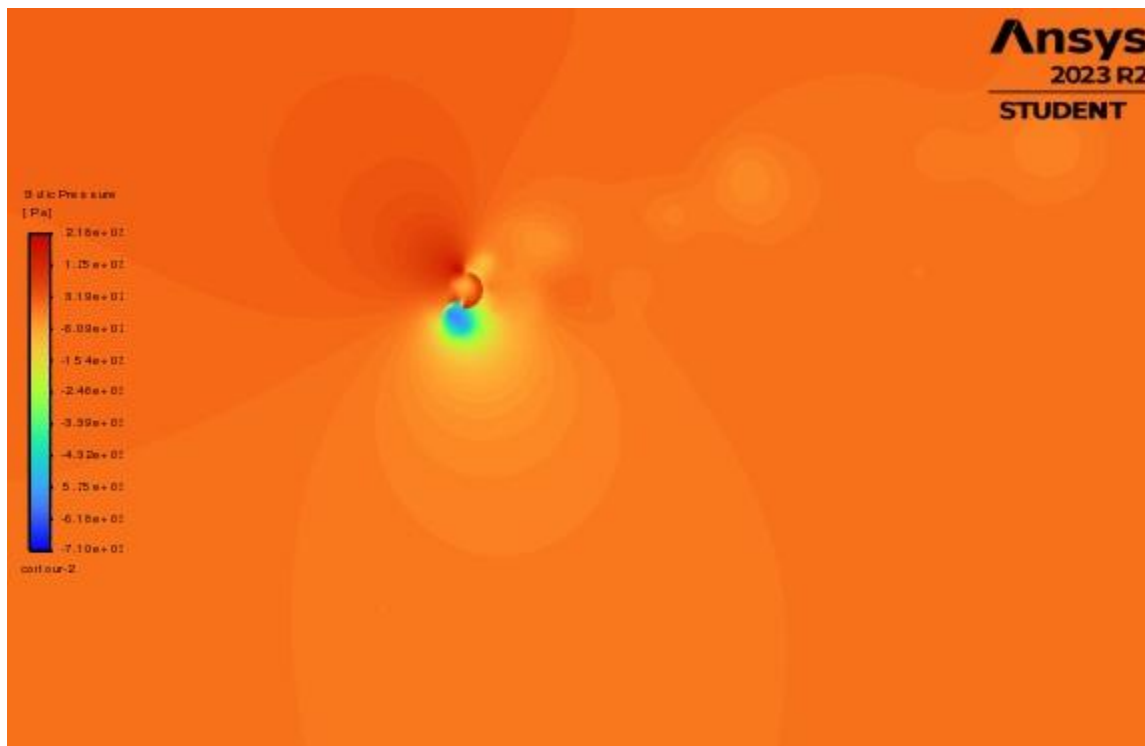
Campo de velocidad para TSR=0.9.



Cuando el rotor crea dos regiones claves las cuales son una zona de alta velocidad alrededor de la turbina de avance como se puede observar en la parte inferior de la turbina y una región de estela aguas abajo de la turbina, estas zonas se ven afectadas por la velocidad de rotación de la turbina y la velocidad del mismo fluido. La primera zona es de gran importancia al escoger el diseño estructural de la turbina puesto que debe ser capaz de soportar los cambios bruscos alrededor de ella en estas zonas, mientras que la zona de estela se hace importante a la hora de estudiar una distribución en ser de estas turbinas, ignorar este fenómeno conllevaría a pérdidas de la eficiencia en los siguientes rotores.

Figura 33.

Campo de presión para $TSR=0.9$.



Así mismo para el contorno de presión se estudió sobre las mismas condiciones de flujo, en este se puede observar cómo existe 2 áreas características de igual forma, la primera está

localizada en la parte superior la cual es un área de alta presión y en la parte inferior un área de baja presión, este diferencial es el que genera el torque y el principio de funcionamiento del rotor Savonius.

5.3 Análisis del Potencial Energético

Para el análisis de la eficiencia energética de la turbina, se realizará un estudio de generación, tomando como ejemplo a una localidad que funge como una de las potenciales beneficiadas por un proyecto energético que implemente las turbinas Savonius para la generación de electricidad. A continuación, se extrae del informe mensual de telemetría de junio de 2023, presentado por el “Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas” (IPSE), la información alusiva al consumo de energía mensual de la localidad de Alto Estero (Magüí Payán, Nariño) con 121 habitantes, la cual centra sus actividades en los ríos Magui y Patia, que con sus grandes dimensiones pueden albergar un “parque hidrocínético” que potencialmente supla las necesidades energéticas.

Tabla 7.

Informe mensual de telemetría para la localidad de Alto Estero.

POTENCIA MÁXIMA MENSUAL [kW]	FECHA DE POTENCIA MÁXIMA MENSUAL	ENERGÍA MENSUAL [kWh]
11.04	Viernes 2 de junio de 2023, 19:15	534
ENERGÍA PROMEDIO DIARIA [kWh]	PROMEDIO DIARIO DE SERVICIO	
18	1 hora y 57 minutos	

Nota. Los datos de esta tabla fueron tomados del *Informe Mensual de Telemetría* (p.10), por el IPSE, 2023.

Esta población es de difícil acceso y al concentrar sus actividades económicas en los ríos mencionados, se podría valorar la posibilidad de implementar un conjunto hidrocínético que supla la energía suministrada de forma sostenible, por lo que, una vez conocidos los datos se procedió a realizar los respectivos cálculos. Primero, se realizó el cálculo teórico, para lo cual, se tomó el punto de mayor coeficiente de potencia obtenible en el río, cuyo valor es 17.9% en un TSR 0.9, con la finalidad de constatar cómo podría impactar en una población real.

Según los datos de la simulación, la potencia promedio disponible del fluido es igual 57.912 [W], que, para llevarlos a valores de energía disponible en la turbina, se aplica el coeficiente de potencia:

$$P_{el} = P_{promedio} \cdot C_p \quad \text{(Ecuación 31)}$$

De donde P_{el} es la potencia eléctrica teórica de la turbina, $P_{promedio}$ es la potencia promedio de funcionamiento, dato que se extrae de la simulación en ANSYS Fluent, al igual que el Coeficiente de Potencia C_p .

$$P_{el} = 57.912 \cdot 0,179 = 10,36 \text{ [W]}$$

Esta energía sería la ideal obtenible de la turbina, sin embargo, para efectos prácticos y una aproximación más cercana a la realidad, se tiene en cuenta pérdidas en la turbina y el generador, que muestran cómo se ve disminuida esta potencia por la eficiencia mecánica y la eficiencia eléctrica, dichas eficiencias, siguiendo lo recomendado por Diago Vidal (2019), se consideran como 60% y 90%, respectivamente en este tipo de instalaciones.

$$P_r = P_{el} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{el} \quad (\text{Ecuación 32})$$

De donde P_r representa la potencia real, η_{mec} la eficiencia mecánica, y η_{el} la eficiencia eléctrica.

$$P_r = 10,35[W] \cdot 0.6 \cdot 0.9 = 5.59[W]$$

Finalmente, se lleva esta potencia a valores de energía, obteniendo una capacidad de generación mensual como se muestra:

$$E = P_r \cdot t \quad (\text{Ecuación 33})$$

De donde E es la energía generada, y t es el tiempo.

$$E = 5,59[W] \cdot 30\text{días} \cdot 24 \frac{h}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ w}} = 4.0248 \left[\frac{kWh}{\text{mes}} \right]$$

Para la localidad de Alto estero (Magui-Nariño), en la cual se consumió un total de 534 kWh en el dicho mes, una única turbina produce el 0.749% de la energía requerida. Claramente no se espera que una turbina llegue a generar una cantidad considerable de energía, pero dadas las condiciones de esta localidad, viviendo cerca de ríos con grandes dimensiones, la instalación de un parque hidrocínético de 100 turbinas lograría producir un 74,9% de la energía requerida en la localidad, y para llegar a generar el 100% de la energía suministrada mensualmente a la comunidad de Alto Estero, se necesitan 133 turbinas en este parque mencionado, convirtiendo a este método de generación en una alternativa viable para lograr brindar el servicio de electricidad en el sector de forma limpia y sostenible.

6. Conclusiones

La tesis desarrollada tuvo como objetivo principal simular una turbina Savonius implementando CFD bajo las condiciones de velocidad consideradas para un río, para analizar el comportamiento de esta. La finalidad del desarrollo de esta investigación fue sentar un precedente y dar paso a más estudios relacionados con la energía hidrocinética, concernientes al análisis de la viabilidad de su implementación en diferentes poblaciones que no pertenezcan al ZNI, pues los autores consideran que este tipo de energía, que se ha explorado poco en el país, representa una solución potencial a los problemas energéticos de Colombia.

Se determinaron los parámetros geométricos y físicos necesarios para las simulaciones mencionadas, identificando un dominio real de una turbina Savonius e implementándolo para su análisis, se realizaron también satisfactoriamente dos estudios de independencia: de malla y de tiempo, que definieron, en el caso de la independencia de malla, las condiciones óptimas de cantidad de elementos que fue finalmente de 400.000 celdas aproximadamente, y de tanto refinación de malla como de suavidad de transición de la misma, que se pueden ver en las figuras 18 y 19. En el caso del estudio de independencia en el tiempo, se definió la cantidad necesaria de giros de la turbina para lograr la convergencia de la simulación, siendo, aproximadamente, 4 giros, y el tamaño de time step que permita resultados más exactos en menor tiempo de simulación, que fue de 0.007932521 segundos, valor correspondiente a ángulo theta θ igual a 1° . Se escogió también, mediante análisis, al “*solver*” basado en la presión- transitorio y el modelo de turbulencia RANS-SST k- ω , necesarios para conseguir resultados que se asemejen lo más posible al fenómeno real, pues se trataba de un fluido incompresible, en flujo constantemente en estado transitorio, y con posibles efectos tanto de paredes, como de flujo libre.

Se validó el mallado realizado mediante datos experimentales obtenidos de Sheldhal, et al., (1978) para una turbina Savonius eólica de relación de traslape de 0.1, incidida por una velocidad de viento de 7 m/s. A la hora de obtener los datos de la simulación para el comportamiento del coeficiente de potencia y de momento, se evaluaron cinco puntos comprendidos entre $TSR=0.6$ y 1, consiguiendo porcentajes de error de máximo 3% aproximadamente para el coeficiente de potencia, y de máximo 3.25% para el coeficiente de momento. Posteriormente se compararon los resultados obtenidos con datos de validación de otros estudios de CFD para la misma turbina, implementando únicamente los datos de $TSR=0.6$ y 1 del coeficiente de potencia, obteniendo porcentajes de error de máximo 1.87% en el caso de 0.6, y de máximo 5.3% para 1, demostrando así que las simulaciones realizadas fueron congruentes tanto con los datos experimentales, como los obtenidos mediante simulaciones de otros autores, concluyendo satisfactoriamente la validación.

Se definió el rango óptimo de funcionamiento de la turbina entre $TSR=0.8$ y 1, siendo el punto de 0.9 en el que logra mayor coeficiente de potencia. Este punto se utilizó para analizar la eficiencia de la producción de energía, extrayendo los datos de momento dados por la simulación correspondiente en ANSYS Fluent, y a partir de ellos, hallando la potencia media para el punto en cuestión. Al valor de potencia obtenido se le aplicó el coeficiente de potencia correspondiente (0.179), posteriormente se definieron y aplicaron rendimientos mecánicos (0.9) y de generación (0.6), obteniendo una potencia de generación de 5.6 Watts. Finalmente, se lleva esta potencia a valores de energía, resultando una capacidad de generación mensual de 4.025 kWh, lo que se puede considerar como un valor importante, pues si se observa el consumo de una población potencialmente beneficiada (Alto Estero, Maguá Payán, Nariño) que fue de 534 kWh en el mes de junio de 2023 según el IPSE, se lograría suplir el 100% de la necesidad energética con un

parque hidrocínético de 133 turbinas instaladas entre el Río Patía y Maguá, cercanos a la población, y que cuentan con las dimensiones necesarias para el implemento de esta cantidad de turbinas.

Por todo lo dicho anteriormente, se concluye que la presente investigación logra establecer los parámetros necesarios para la simulación de una turbina Savonius de funcionamiento en ríos por medio de las herramientas CFD de ANSYS Fluent, también de valida estos parámetros por medio de la replicación de los resultados de estudios experimentales para una turbina eólica idéntica y verifica estos resultados con otras simulaciones en el estado del arte, para posteriormente realizar un tratamiento de datos con los resultados obtenidos de la simulación, que busca corroborar que el comportamiento obtenido, ilustrar este comportamiento y aportar al estado del arte una posible solución a una problemática socioeconómica real del país, haciendo un análisis energético para presentar una capacidad aproximada de generación de la turbina simulada y planteando la posibilidad de llevar a cabo parques de generación energética con energía hidrocínética.

7. Recomendaciones

Para la replicación de este trabajo de investigación, los autores recomiendan contar con una unidad computacional de 8 núcleos, y emplear softwares diferentes a ANSYS como CFX para verificar externamente los resultados, y si es posible, validar los resultados con datos experimentales de una turbina con las mismas condiciones, para así ver qué software logra mayor exactitud. También se recomienda aprovechar las ventajas computacionales de la unidad de 8 núcleos para lograr una transición más suave en la zona de transición del mallado entre el fluido y las palas de la turbina, que así se logra obtener datos más precisos.

Para evaluar la viabilidad de la implementación de un proyecto energético con las turbinas Savonius, se recomienda realizar estudios económicos y ecológicos, pues al necesitarse una cantidad considerable de turbinas para suplir la energía de una población pequeña, el costo de fabricación y de instalación puede sobrepasar los beneficios obtenidos, y al mismo tiempo, se pueden generar grandes daños en la fauna del río,

8. Trabajos futuros

Para seguir ahondando en el tema del análisis de la energía hidrocínética implementando la dinámica de fluidos computacional, los autores proponen realizar estudios de optimización de la turbina Savonius, como lo es investigar el comportamiento de los coeficientes con la variación geométrica de los álabes, o el aumento del número de ellos, así como también la inclusión de uno o más deflectores estáticos girando, o combinados con el fin de analizar los cambios de los coeficientes en cada una de las diferentes condiciones y combinaciones, buscando así una optimización en la generación de energía.

Siguiendo con la línea del análisis por CFD de la energía hidrocínética, los autores consideran que un trabajo interesante sería replicar la simulación 2D de la turbina para un modelo 3D, pues se espera de la simulación de tres dimensiones, si se tienen los recursos computacionales necesarios, que logre una descripción del fenómeno más exacta en cuanto a resultados se refiere y más clara para el lector en cuanto a las representaciones visuales de la turbina, como el video de la turbina en funcionamiento que se obtiene en el post-procesamiento. El fin de esta simulación 3D sería comparar sus resultados con los obtenidos en investigaciones como la hecha en la presente tesis, mostrando con porcentajes de error las diferencias con el estado del arte en dos dimensiones, y confirmando o negando que la reducción del fenómeno a dos dimensiones fue lograda de forma correcta en las investigaciones de donde se extrajeron los resultados para su comparación.

Viendo que una turbina por sí sola no puede generar una cantidad de kilo Watt hora significativa, se propone un trabajo de investigación donde se simule mediante CFD el

comportamiento del fluido de un río con varias turbinas instaladas en su cauce, así como el estudio de los coeficientes de estas turbinas, con el fin de analizar su comportamiento y definir distancias óptimas de separación de estas turbinas en un cauce del río, tanto para conseguir un menor impacto ecológico, como para realizar un análisis energético, pues como se mencionó, se hace necesario implementar varias turbinas para lograr obtener una producción de energía importante.

Para estudiar principalmente la energía hidrocínética, los autores proponen realizar un proyecto enfocado en llevar la turbina simulada a un prototipo en la realidad y probarla en diferentes condiciones, así como unas similares a las definidas para las simulaciones del presente proyecto, con el fin de poder visualizar curvas de comportamiento experimentales, abriendo las puertas a más estudios similares al realizado en esta tesis, y brindando la oportunidad de validar estos estudios con condiciones replicadas en la realidad.

Hablando de la sección de generación específicamente, se propone realizar un estudio a profundidad sobre el tipo de generador más adecuado para la producción de energía eléctrica mediante el uso de turbinas hidrocínéticas. Esta investigación buscaría disminuir en lo posible las pérdidas energéticas a la hora de convertir la energía cinética rotacional de la turbina una vez transformada la energía del flujo del agua, a energía eléctrica en el conjunto rotor-estator del generador eléctrico.

Referencias Bibliográficas

- Alizadeh, H., et al. (2020). CFD-based improvement of Savonius type hydrokinetic turbine using optimized barrier at the low-speed flows. *Ocean Engineering*, 202, 107178.
- Basumatary, Mithinga, et al (2021). Experimental verification of improved performance of Savonius turbine with a combined lift and drag based blade profile for ultra-low head river application. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, volumen 44 ,100999, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.100999>.
- Bianchini, A., et al. (2017). Effectiveness of two-dimensional CFD simulations for Darrieus VAWTs: a combined numerical and experimental assessment. *Energy Conversion and Management*, 136, 318-328.
- Calderón, David (2021). Dinámica de fluidos computacional. Integral: Ingenieros consultores. <https://www.integral.com.co/dinamica-de-fluidos-computacional/>
- Carrillo, G. A. *Análisis de incertezas en el cómputo de flujos turbulentos empleando Open FOAM®* (tesis de pregrado), Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Caruncho Salgado, F. (2019). *Análisis CFD del sistema de climatización de un recinto* (tesis de pregrado), Universidad de La Coruña, España.
- Cerejido López, G. (2022). *Estudio experimental de una turbina hidrocínética Savonius* (tesis de pregrado), Universidad de Oviedo, España.
- Diago Vidal, C. (2019). *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico* (tesis de posgrado), Universidad Politécnica de Valencia, España.

Dinámica de fluidos computacional: ¿Qué es? (s.f). ESSS.

<https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

Fajardo, P., & Alberto, Y. (2021). *Análisis de una turbina eólica tipo Savonius por medio de dinámica de fluidos computacional* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

García, Luis F (2014). *Análisis aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

García, Mario A (2011). *Turbomáquinas – Turbinas Hidráulicas*.

Idrissi, M. S. et al. (2023). Efficiency improvement of Savonius wind turbine by mean of novel deflector system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(8), 396.

IPSE (2023). Informe mensual de telemetría.

https://ipse.gov.co/documentos_cmn/documentos/informes_mensuales_de_telemetria/2023/junio/INFORME_MENSUAL_TELEMETRIA_JUNIO_DE_2023.pdf

IPSE (2022). Rendición de cuentas. <https://ipse.gov.co/mapa-del-sitio/transparencia-ipse/planeacion/rendicion-de-cuentas/rendicion-de-cuentas-al-ciudadano/>

Khan, M. J., et al. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied energy*, 86(10), 1823-1835.

- Kumar, D., & Sarkar, S. (2016). Numerical investigation of hydraulic load and stress induced in Savonius hydrokinetic turbine with the effects of augmentation techniques through fluid-structure interaction analysis. *Energy, 116*, 609-618
- Li, F., et al., (2022). Performance analysis of Savonius hydrokinetic turbine capturing wave energy under different operating strategies. *Energy Conversion and Management, 251*, 115006.
- Moukalled, F., et al (2016). The finite volume method (pp. 103-135). *Springer International Publishing*.
- ONU (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*
<https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>
- Pérez, G. J. M., García, A., & Rojas, D. (2014). *DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS DE TURBINA HIDROKINÉTICA TIPO GORLOV*. vol, 1, 88.
- Rengma, T. S., & Subbarao, P. M. V. (2022). Optimization of semicircular blade profile of Savonius hydrokinetic turbine using artificial neural network. *Renewable Energy, 200*, 658-673.
- Restrepo, Karen Y (2021). *Turbinas hidrocinéticas utilizadas para la generación de energía: Características, principio de funcionamiento e impactos ambientales asociados* (Tesis de pregrado), Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Medellín.
- Sheldahl, R. E., et al. (1978). Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors. *Journal of Energy, 2(3)*, 160-164.