

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Efecto de eficiencia al modificar la geometría de álabes de una turbina H Darrieus

Mateo Arrieta Gómez

Ingeniería Mecatrónica

Asesores:

Angie Judith Guevara Muñoz
Diego Andrés Hincapié Zuluaga

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia
2022

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

Este trabajo busca mejorar el rendimiento de la turbina hidrocínética tipo H Darrieus para la generación de energía eléctrica. Se evaluó por medio de simulaciones numéricas el efecto en la eficiencia de la turbina al realizar cinco modificaciones geométricas a los álabes simétricos tipo NACA0018. Se usó el programa comercial ANSYS® V22.2 para llevar a cabo el estudio, el diseño CAD de los diferentes casos de modificaciones se realizó en el módulo SpaceClaim, la discretización se llevó a cabo en ICEM CFD donde elementos rectangulares fueron implementados para representar los dominios y la simulación fluido-dinámica se ejecutó en el módulo Fluent. La variable de respuesta configurada fue el coeficiente de momento y el momento, a partir del cual se puede calcular la eficiencia de cada modificación. Se compararon todos los casos evaluados con respecto al caso estándar. Entre los resultados más destacados, se encontró que la abertura circular superior genera eficiencia de 51.88%, mientras que el caso estándar tiene una eficiencia del 45.16%, es decir que la modificación de abertura circular mejora la eficiencia de las turbinas H Darrieus en un 15% con respecto al caso estándar.

Palabras clave: Hidrocínética, H Darrieus, CFD, Optimización.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

Agradezco al ITM y al laboratorio de modelado por permitirme el acceso a todos los recursos e infraestructura necesarios para el desarrollo del estudio.

También agradezco a mi familia y cercanos, que no dudaron en apoyarme y llenarme de ánimos. Especialmente Agradezco a mis asesores Angie Guevara y a Diego Hincapié, quienes creyeron en mí.

Y último, pero más importante, agradezco al que creo todo de la nada.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

COP21 Cumbre Mundial de Cambio Climático en París

PCH Pequeña Central Hidroeléctrica

TSR Relación de velocidad de punta

CO Abertura circular

LEO Abertura cerca de borde de ataque

TEO Abertura cerca de borde de fuga

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Generalidades de la turbina H Darrieus	8
2.2. Análisis numérico	10
2.3. Análisis numérico experimental	11
3. METODOLOGÍA.....	12
3.1. Diseño turbina H Darrieus	12
Diseño de álabes estándar y modificados	13
3.2. Generación de elementos finitos	16
3.3. Parámetros de simulación y condiciones de frontera.....	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. Estudio de independencia de malla	20
4.2. Validación de comportamiento de la turbina H Darrieus	21
4.3. Efecto en el rendimiento al modificar el álabe	23
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	26
5.1. Conclusiones.....	26
Recomendaciones	26
Trabajos Futuros.....	26
REFERENCIAS	27

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

Frente al pacto de cambio energético expuesto en la Cumbre Mundial de Cambio Climático en París (COP21), Colombia se ha comprometido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% para el año 2030, principalmente aplicando decisiones legislativas y políticas, con este propósito se ha enfocado en la diversificación de la matriz energética para aumentar la participación de fuentes renovables y el uso de tecnologías renovables (Sandoval et al., 2020). En Colombia es notable la creciente necesidad de energía eléctrica al punto que la demanda de energía creció 3.72% respecto al mes de febrero del 2022 comparado con el mismo mes del 2021 (XM, 2022). En estos avances de diversificar la matriz energética, se reportó que en el año 2018 las plantas hidroeléctricas suplían el 58% de la oferta total. En Colombia un 53% del territorio nacional carece de conexión a la red nacional de electricidad (IPSE, 2022), además, estudios realizados exponen la dificultad de transmitir energía eléctrica a zonas remotas o rurales (Dyner et al., 2005). Una solución para suplir energía eléctrica a estas zonas es implementar Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH). Las PCH son centrales de generación eléctrica entre 1MW y 10MW que aprovechan la energía potencial y cinética de pequeños flujos de agua. Estas centrales hidroeléctricas, como solución a la problemática, se pueden operar en una de las fuentes hídricas más cercana al área de necesidad eléctrica (Julian et al., 2017), por ende, disminuir costos asociados a la transmisión eléctrica, sin embargo, debido a la dificultad de acceso a estas zonas, se obstaculiza la instalación de PCH. Lo anteriormente mencionado ha impulsado el estudio para implementar generadores hídricos no convencionales en estas zonas, por ejemplo, diferentes investigaciones se enfocan en el desarrollo de turbinas que sean eficientes, de bajo costo y de fácil instalación (Vargas et al., 2016). Tal es el caso de las turbinas hidrocínicas tipo H Darrieus, las cuales son fáciles de manufacturar, transportar e instalar en ríos de tamaños angostos o de difícil acceso (Kirke, 2020). Utilizar turbinas tipo H Darrieus es una solución viable para la generación de energía eléctrica dado a su fácil instalación y bajo costo de manufactura, sin embargo, esta turbina tiene aspectos a mejorar como el autoarranque y la eficiencia. Este trabajo busca aumentar la extracción de energía de las fuentes hídricas al

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

experimentar con modificaciones en la geometría de los álabes de la turbina H Darrieus. Los objetivos de esta investigación son los siguientes:

- **General**
 - Evaluar la eficiencia obtenida de un perfil tipo NACA con diferentes tipos de abertura entre la superficie superior e inferior y abertura circular superior del mismo mediante simulación fluido – dinámica.
- **Específicos**
 - Analizar y comparar el desempeño de cada ajuste de abertura de los álabes diseñados, en función del perfil de álabe estándar.
 - Evaluar el comportamiento de la turbina H Darrieus con cada ajuste cuando se configura a diferentes relaciones de velocidad de punta (TSR por sus siglas en ingles).

La estructura de este trabajo de grado está dividida de la siguiente manera:

Capítulo 2 introduce a la turbina H Darrieus como solución a la problemática expuesta, se define las matemáticas que se usara para evaluar el rendimiento de esta y se exponen estudios realizados que por medio de metodologías similares que buscan mejorar el rendimiento de la turbina.

Capítulo 3 describe la metodología llevada a cabo en el estudio para realizar las simulaciones numéricas.

Capítulo 4 muestra los resultados y el análisis de cada caso diseñado para optimizar el rendimiento de la turbina H Darrieus.

Capítulo 5 se encuentran las conclusiones de los resultados del presente trabajo, donde se exponen la opinión sobre los hallazgos del estudio, y a partir de estos se proponen estrategias para obtener resultados significativos en torno a la optimización de la eficiencia de la turbina H Darrieus.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades de la turbina H Darrieus

Las turbinas H Darrieus comúnmente se utilizaban como aerogeneradores, pero por sus principios de dinámica de fluidos (fluido dinámico) se pueden aprovechar dentro del agua, es decir que puede ser instalada en mares, ríos y canales. Esta turbina, como se observa en la Figura 1 se conforma por álabes rectos (tres álabes en este caso) que generan rotación cuando se crea una diferencia de presión cuando el agua fluye alrededor de los mismos (Rehman et al., 2018).

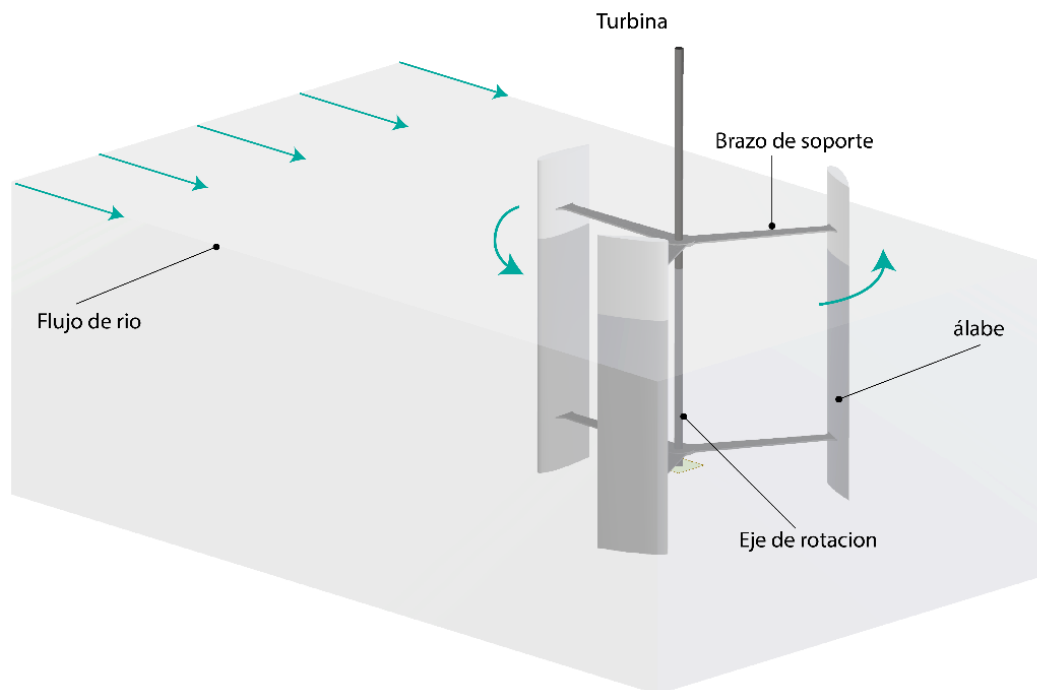


Figura 1 Turbina H Darrieus. [Elaboración propia]

La turbina H Darrieus para aplicaciones hidrocínéticas no requiere de grandes construcciones civiles como represas o canales externos dado a que puede aprovechar el flujo natural del agua en los ríos. Lo anterior favorece la construcción de esta en zonas de difícil acceso (Furukawa et al., 2010).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La potencia de la turbina H Darrieus puede ser calculada con la ecuación 2.1-1 donde T es el momento promedio de la turbina y w es la velocidad angular (Douak & Aouachria, 2015).

$$P = Tw \quad 2.1-1$$

El coeficiente de potencia se calcula con la ecuación 2.1-2 donde P es la potencia calculada anteriormente, ρ es la densidad del fluido, V la velocidad del fluido, R el radio de la turbina y H la altura de los álabes (Saryazdi & Boroushaki, 2018).

$$C_P = \frac{P}{\rho V^3 RH} \quad 2.1-2$$

La relación de velocidad de punta de la turbina (TSR por sus siglas en inglés) calcula la relación entre la velocidad angular de la turbina con la velocidad de flujo del fluido (ecuación 2.1-3). Esta medida se hace necesaria dado a que el coeficiente de potencia está en función del TSR (Wardhana & Fridayana, 2020), por ende, la eficiencia está en función del TSR:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad 2.1-3$$

Donde ω es la velocidad angular de la turbina.

La solidez de la turbina es un parámetro adimensional de la turbina. Este nos da la dimensión de la turbina, debido a que relaciona todos los parámetros dimensionales, donde N representa el número de álabes y c la longitud de cuerda de los álabes.. En este estudio la solidez se mantendrá constante para todos los casos. Para estudios 2D se define de la siguiente manera (Ecuación 2.1-4) (Alqurashi & Mohamed, 2020):

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad 2.1-4$$

Los parámetros geométricos de los álabes influyen en el rendimiento de la turbina, de tal forma que se han realizado estudios donde experimentan con diseños de álabes simétricos y asimétricos para analizar sus efectos en la turbina H Darrieus y se ha concluido que el diseño del área transversal de los álabes afecta la eficiencia de la turbina H Darrieus (M. H. Mohamed, 2012),

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

sin embargo, estas turbinas presentan bajas eficiencias. Debido lo anterior, en varias investigaciones se ha modificado la geometría de los álabes, con el objetivo mejorar la eficiencia de la generación de energía. Estos estudios se pueden dividir en estudios numéricos que implementan simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) por sus siglas en inglés y estudios numérico-experimentales los cuales realizan la validación de los resultados CFD por medio de montajes o instalaciones en sitio de la turbina H Darrieus.

2.2. Análisis numérico

Un estudio realizado por Omar S. Mohamed et al. (2020) buscó el parámetro geométrico de una abertura a través del álabe que abre desde la superficie superior hasta la superficie inferior para obtener una alta relación de sustentación-arrastre para luego aplicar esta configuración optimizada en la aplicación de turbinas verticales y llevaron a cabo simulaciones con diferentes rangos de TSR. Los resultados mostraron el efecto de la abertura en el coeficiente de momento, comparado con los resultados del caso estándar. Encontraron un aumento significativo en el momento del álabe con abertura en TSR bajos comparado al caso estándar; se obtuvo un coeficiente de momento máximo de 0.15 con un TSR de 2.0, más del doble comparado con el caso estándar en un mismo TSR.

Saman Beyhaghi et al. (2017) estudiaron la modificación de la geometría de un álabe con el objetivo de cambiar el patrón de flujo alrededor del álabe para disminuir el arrastre, aumentar la sustentación y sobre todo, incrementar la generación de energía. En esta investigación aplicaron una ranura o abertura que pasa por el centro del perfil que comienza desde el borde de ataque y termina en la superficie inferior cerca del borde de fuga. Los resultados mostraron una relación inversa entre el ángulo de ataque y coeficientes de sustentación; para un ángulo de ataque, el perfil demostró una mejora de coeficiente de sustentación (a esta mejora se le incluye un penalti de arrastre), mientras que, con un alto ángulo de ataque, la sustentación disminuye.

De trabajos anteriormente realizados por Yousefi Roshan et al. (2021) se expone el rendimiento de la turbina H Darrieus al aplicarle una abertura circular en los álabes tipo NACA 0021. Uno de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

sus objetivos fue encontrar la posición de la abertura más eficiente y de este encontraron que la posición de mayor rendimiento fue en la parte superior del álabe cerca del borde de fuga (UST). Su mejor resultado fue un 18% de optimización en la eficiencia con este tipo de abertura.

2.3. Análisis numérico experimental

Dhanak et al. (2019). realizaron un estudio numérico-experimental para encontrar el efecto de una abertura en el álabe en los coeficientes de sustentación y la relación sustentación-arrastre, todo respecto al caso estándar. Los autores realizaron una abertura que atraviesa el área seccional del álabe desde la superficie superior hasta la superficie inferior y esta abertura se encuentra cerca del borde de ataque del álabe, en su estudio variaron el tamaño de la abertura y ángulo de esta para determinar la configuración óptima. Los resultados experimentales demostraron que el álabe con esta abertura tiene un coeficiente de sustentación más alto y un coeficiente de arrastre más bajo en ángulos de ataque mayores a 11° en comparación al caso estándar. Reportaron una mejora de 58% de coeficiente de sustentación en comparación al caso estándar. Estos resultados, según los autores, tienen una aplicación significativa en la aeronáutica y la generación de energía.

Los trabajos mencionados buscan mejorar la eficiencia de las turbinas H Darrieus a través de la modificación de los mediante la ayuda de simulación CFD. Sin embargo, se encontró que aún es posible evaluar otras modificaciones geométricas de las aberturas en los álabes. Uno de estos ajustes que no se han estudiado es la abertura entre la superficie superior e inferior cerca del borde de fuga del álabe, el cual es uno de los ajustes a experimentar en este trabajo, por lo tanto, este trabajo se encargará de analizar el efecto en la eficiencia de la turbina con parámetros y ajustes de aberturas no experimentados antes.

3. METODOLOGÍA

El siguiente diagrama (véase la Figura 2) resume el procedimiento que se llevó a cabo para obtener resultados precisos del estudio numérico de la turbina H Darrieus con modificaciones:

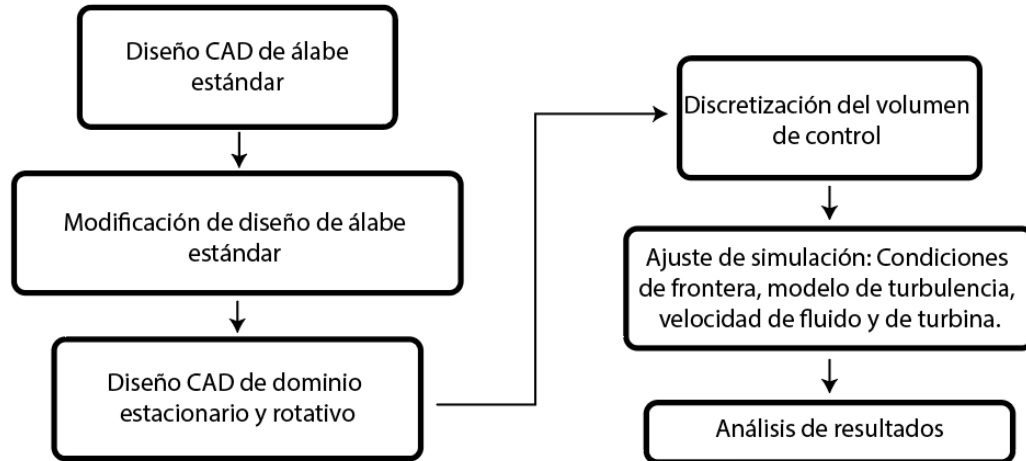


Figura 2 Metodología de Estudio. [Elaboración propia]

3.1. Diseño turbina H Darrieus

El diseño del sistema general consta del espacio de flujo del fluido y la turbina. Las medidas del sistema se configuran en función de la longitud de cuerda (C) del álabe caso estándar. Las medidas del espacio de flujo y de la turbina se mantienen de forma constante para todos los casos a estudiar, dado a que este trabajo solo modifica el diseño de los álabes. Las medidas de los dominios en función de la longitud de cuerda se muestran en la Figura 3.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

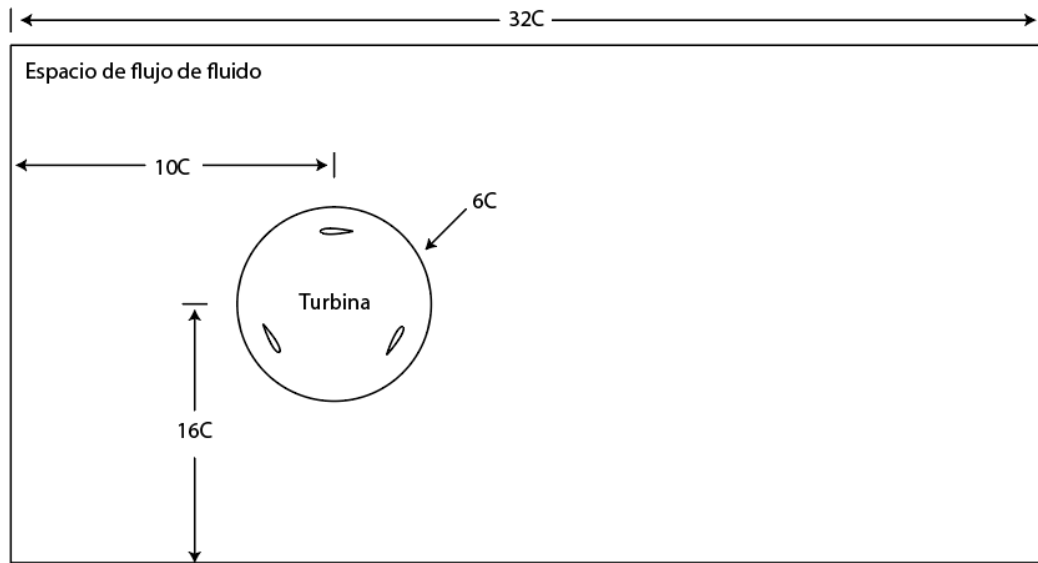


Figura 3 Diseño y dimensiones de sistema de la H Darrieus, donde C es la longitud de cuerda del álabe. [Elaboración propia]

Se utilizó el módulo de diseño SpaceClaim del programa comercial ANSYS® V22.2. para diseñar la geometría del dominio estacionario la cual corresponde al canal donde fluye agua y dominio rotativo que corresponde la turbina.

Diseño de álabes estándar y modificados

Se usó módulo de diseño SpaceClaim para generar la geometría de los álabes. Para este trabajo se realizaron cinco (5) diferentes tipos de alteraciones en la geometría del caso estándar. El álabe base (véase la Figura 4) corresponde a un perfil NACA 0018. Este es un álabe de perfil simétrico y se escogió por su amplio uso en la literatura (Rogowski et al., 2021).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

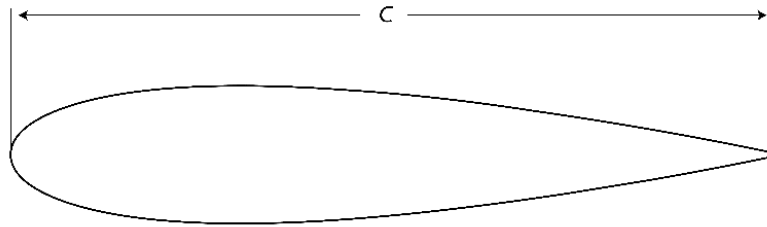


Figura 4 Diseño estándar de álabe. [Elaboración propia]

La longitud de cuerda (C) del caso estándar se ajusta a 200 mm y se mantiene para los demás casos de álabes que posteriormente se mostrarán. Se diseñó un álabe con una abertura circular desde ahora (CO), véase la Figura 5. El ajuste de la cavidad como la posición y tamaño se realizó con los siguientes parámetros $W_1 = 42mm$, $W_2 = 16mm$ y $L = 120mm$.

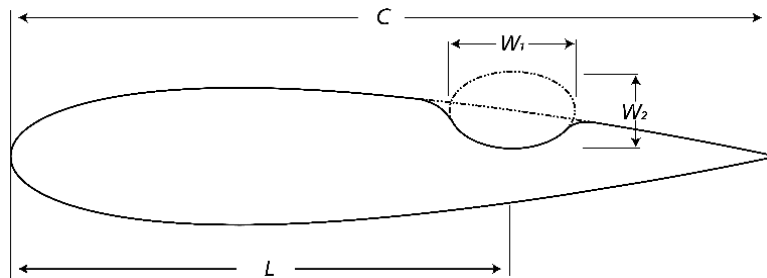


Figura 5 Abertura circular en álabe estándar. [Elaboración propia]

Con base al método de optimización del rendimiento de la H Darrieus planteado por O. S. Mohamed et al., (2020) se optó por evaluar parámetros no experimentados de la abertura cerca del borde de ataque (LEO por sus siglas en inglés) (véase la Figura 6). Para este se realizaron dos diseños con parámetros de abertura diferentes (Tabla 1).

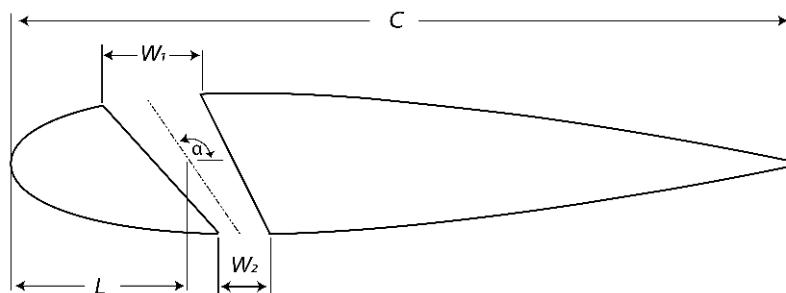


Figura 6 Abertura cerca de borde de ataque. [Elaboración propia]

Los ajustes de los dos diseños LEO se muestran en la Tabla 1:

Diseño	W_1	W_2	L	α
LEO #1	30 mm	14 mm	60 mm	140°
LEO #2	36 mm	18 mm	60 mm	150°

Tabla 1 Parámetros de diseño para casos de abertura cerca de borde de ataque

La última modificación con abertura fue hecha cerca del borde de fuga del álabe (TEO)

(véase la Figura 7). Para este caso se realizaron dos diseños diferentes (Tabla 2):

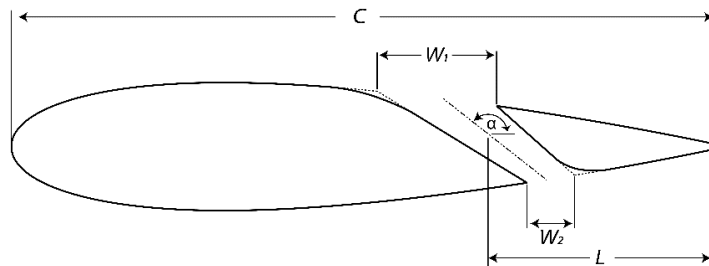


Figura 7 Abertura cerca de borde de fuga. [Elaboración propia]

Los ajustes de los dos diseños TEO se muestran en la Tabla 2:

Diseño	W_1	W_2	L	α
TEO #1	30 mm	14 mm	70 mm	140°
TEO #2	36 mm	15 mm	70 mm	150°

Tabla 2 Parámetros de diseño para casos de abertura cerca de borde de fuga

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En resumen, los diseños CAD realizados en el módulo SpaceClaim se muestran en la Figura 8:

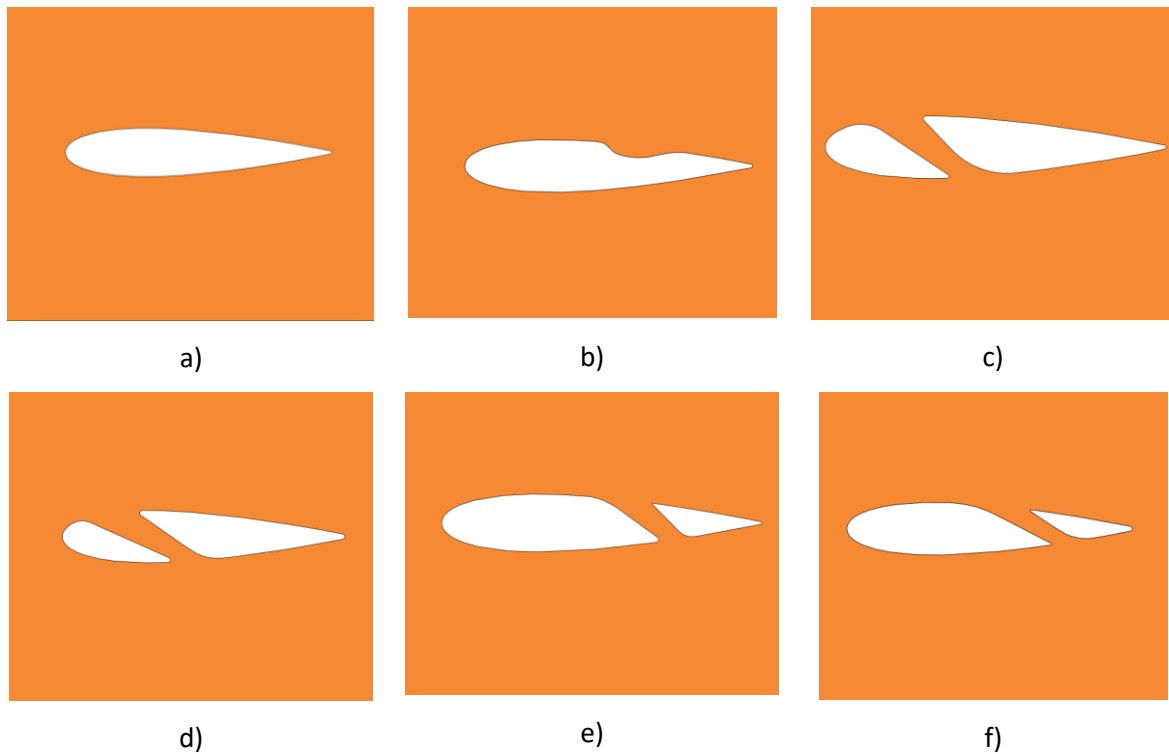


Figura 8 a) Caso estándar b) abertura circular c) abertura en borde de ataque #1 d) abertura en borde de ataque #2 e) abertura en borde de fuga #1 f) abertura en borde de fuga #2 [Elaboración propia]

3.2. Generación de elementos finitos

Se usó del módulo ICEM CFD del programa comercial ANSYS® V22.2. para generar los elementos finitos de todos los casos. La malla se realizó en dos partes diferentes, dominio estacionario (Figura 9) y rotativo (Figura 10.a). El dominio rotativo se realizó con tamaños de elementos más finos a comparación de la malla en el dominio estacionario, debido a que en este sitio se extraen los datos de las variables de interés.

La malla tangente al borde de los álabes (Figura 10.b) fue refinada teniendo en cuenta el Y^+ definido, esto es para definir la magnitud de la primera capa de la malla, esto se realizó con el fin de garantizar que se obtengan resultados precisos en la zona viscosa del álabe. Se utilizó la ecuación 3.3-1 para hallar la altura de la primera capa tangente al álabe (Yunus Cengel, 2006).

$$y_1 = \frac{\mu \cdot y +}{\rho \cdot U_\tau} \quad 3.2-1$$

Donde μ es la viscosidad cinemática del fluido, $y +$ definido en 10, ρ es la densidad del agua a 25 y $U_\tau =$ la velocidad de fricción (Ecuación 3.3-2)

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad 3.2-2$$

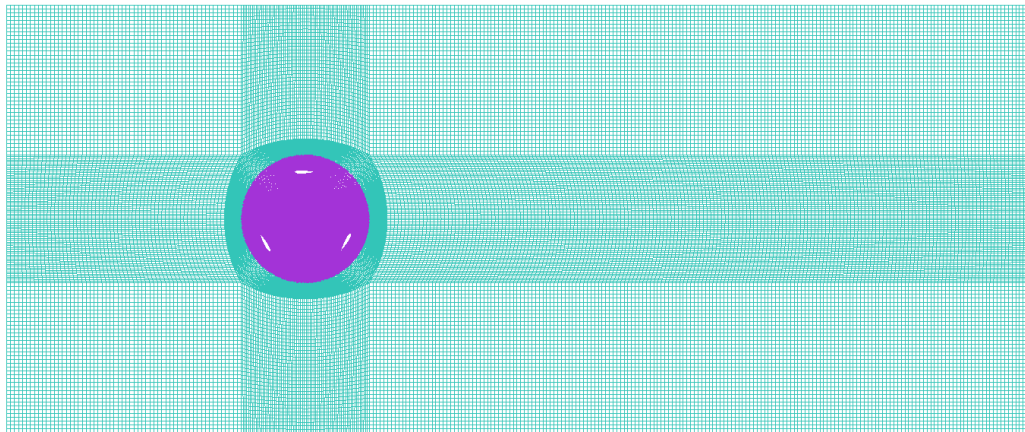


Figura 9 Malla de dominio estacionario y rotativo [Elaboración propia]

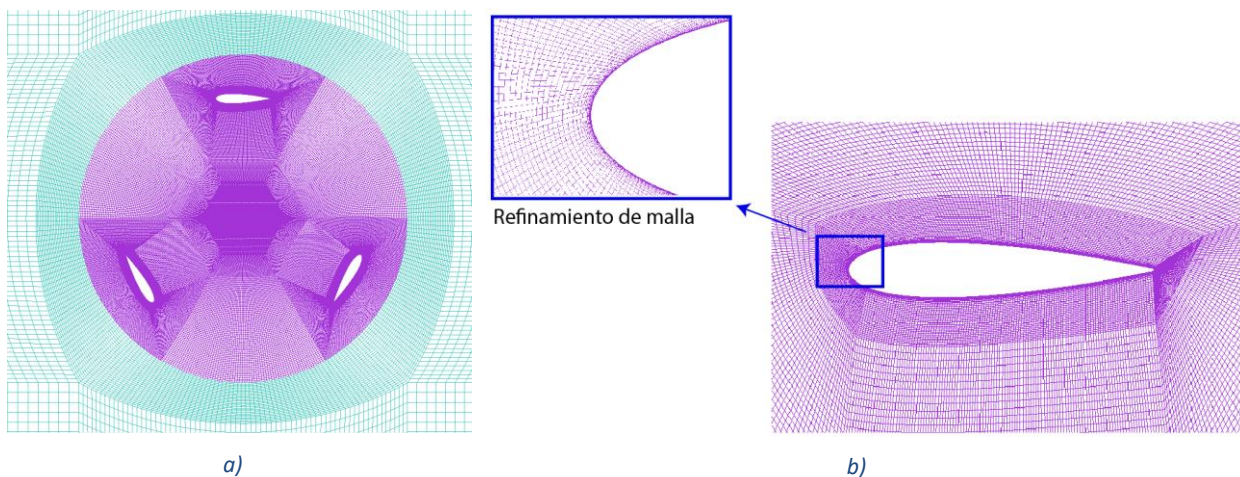


Figura 10 Detalle de malla en álabes a) dominio rotativo b) malla tangente a álabe refinada [Elaboración propia]

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3.3. Parámetros de simulación y condiciones de frontera

La simulación fluido-dinámica se llevó a cabo en el módulo Fluent del programa comercial ANSYS® V22.2. Las condiciones de frontera están previamente definidas en el módulo de creación de elementos finitos y en el módulo actual se ajustan los parámetros de entrada y salida tales como, velocidad del fluido que se establece de 1 m/s en la entrada del dominio estacionario, presión de salida que es 0 Pa y la condición de malla deslizante en las interfaces para enlazar el dominio estacionario con el dominio rotativo (Figura 11).

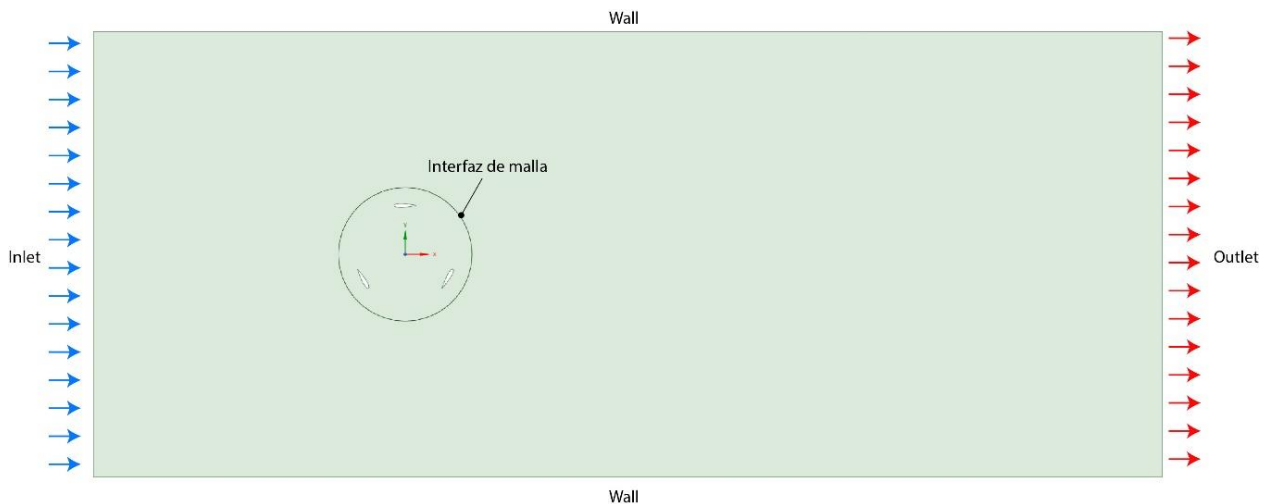


Figura 11 Definición de condiciones de frontera [Elaboración propia]

Dado que la simulación es de tipo transitoria se debe definir la rotación del dominio rotativo (turbina) para de este modo tener los resultados de eficiencia en función del TSR. El sistema estará sometido a un solo fluido que es agua líquida, esto es, el dominio estacionario y dominio rotativo estarán sometidos a flujo de agua durante toda la simulación. La duración de la simulación se estableció en 10 segundos, con 2000 muestras y un tamaño de 0.005 segundos entre cada muestra, tiempo suficiente para el sistema estabilizarse. La Tabla 3 resume lo anteriormente dicho.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Parámetro	Valor
Tipo de simulación	Transitoria
Velocidad de entrada	1 [m/s]
Velocidad angular	2.22 [rad/s] a 7.77 [rad/s]
Temperatura	25°
Presión de salida	0 Pa

Tabla 3 Resumen de parámetros de simulación

Se definió el modelo de turbulencia K-ε realizable como solucionador del sistema. Estas dos ecuaciones se definen de la siguiente manera (M. H. Mohamed et al., 2015):

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_j}(pkx_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - Y_M + S_k \quad 3.3-1$$

y la ecuación

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(p\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + pC_1 S_\varepsilon + pC_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad 3.3-2$$

Donde

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{n}{n+5} \right], \quad n = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad 3.3-3$$

En estas ecuaciones G_k representa la generación de energía cinética turbia debido a los gradientes de velocidad media, G_b es la generación de energía cinética turbia debido a la flotabilidad, Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible hacia la velocidad de general de disipación, C_2 y $C_{1\varepsilon}$ son constantes, σ_k y σ_ε son los números turbulentos Prandtl para k y ε , respectivamente. S_k y S_ε son términos de fuente definidos por el usuario (Fluent Inc., 2006).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estudio de independencia de malla

Se realizó el estudio de mallas para establecer un límite de número de elementos para el cual se garantizan resultados precisos y estables. Para el estudio de mallas se utilizó el diseño estándar del álabe. Se llevaron a cabo cuatro (4) diferentes mallas desde 21697 elementos hasta 242767 elementos. Se estableció como parámetro de convergencia el momento de la turbina (véase la Figura 12).

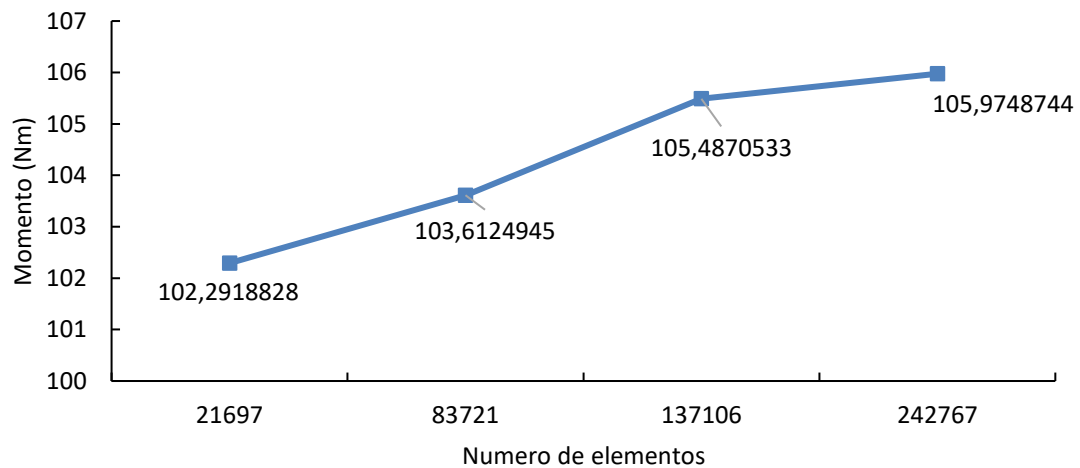


Figura 12 Análisis de convergencia en función de número de elementos de malla

Se escogió la malla de 137000 elementos, dado a que presenta un 0,46% de diferencia respecto al siguiente número de nodos. Se generó la malla para los cinco (5) casos de estudio donde se mantiene un promedio de 180000 elementos y la Tabla 4 muestra las métricas de las mallas, donde el Mínimo Determinante 2x2x2 debe ser mayor a 0.3, la Máxima Relación de Aspecto que debe ser menor a 100 y la Mínima calidad debe ser mayor a 0.3 (Ansys Inc., 2013).

Caso	Número de elementos	Min. Determinante 2x2x2	Max. Relación de aspecto	Min. Calidad
Estándar	183763	0.819	92.4	0.819
CO	158543	0.837	35.5	0.837
LEO #1	186237	0.668	105	0.668
LEO #2	168708	0.698	32.3	0.698
TEO #1	180842	0.791	38.4	0.791
TEO #2	197830	0.683	66.9	0.683

Tabla 4 Métricas de calidad para las mallas

4.2. Validación de comportamiento de la turbina H Darrieus

Se tomó el caso estándar ajustado a un TSR de 1.5 para mostrar y validar el comportamiento del fluido en el sistema entero. En la Figura 13 se nota como el flujo ingresó de forma laminar y posteriormente se vuelve turbulento al entrar en contacto con los álabes de la turbina, generando una estela con comportamiento ondulatorio.

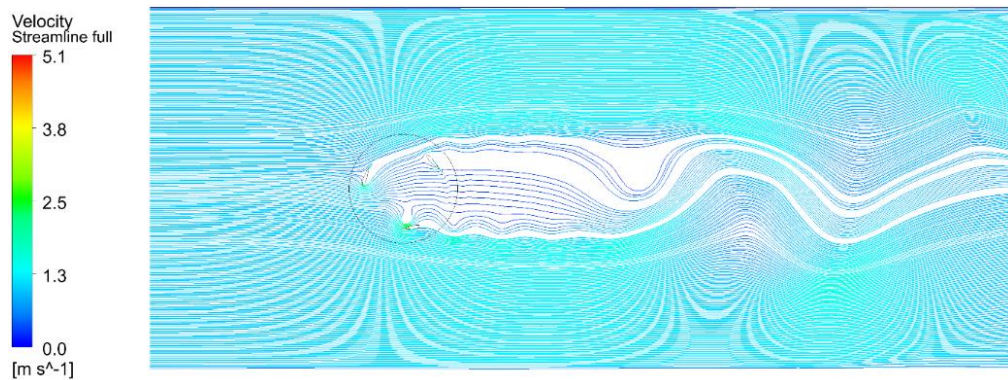


Figura 13 Líneas de flujo del sistema en el caso estándar

Los resultados de la presión en el sistema demuestran la relación que tiene el momento torsional de esta con la diferencia de presión causada por la interacción del flujo con los álabes. En la Figura 14 se puede encontrar los contornos de presión del caso estándar (Figura 14.a) y el caso CO (Figura 14.b) que mejor resultados dio para un TSR de 1.5. Los resultados se comparan de forma cualitativa, al apreciar la diferencia de intensidad de los contornos de presión en cada caso, además se realiza la diferencia de la máxima y mínima presión, cuanto mayor sea la diferencia

de presión se puede suponer que será mayor el momento torsional de la turbina, más no necesariamente la mejor eficiencia dado a que esta es en función del TSR.

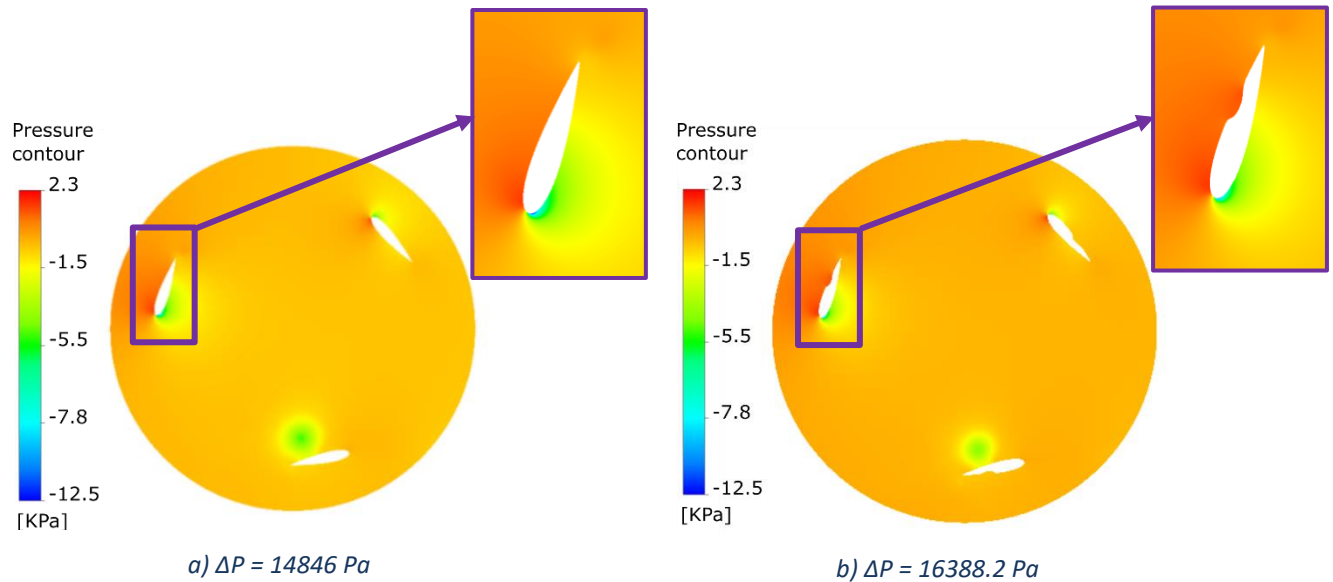


Figura 14 Contornos de presión de casos a) estándar para un TSR de 1.5 b) CO para un TSR de 1.5

Cabe aclarar que relacionar el momento torsional con la diferencia de presión ocurre cuando el contorno de presión máxima y mínima se dispersa sobre toda la superficie del álabe, como se puede notar en la Figura 15.a, caso contrario como se ve en la Figura 15.b que la presión máxima y la mínima ocurren en puntos concentrados causados por la alta velocidad angular de la turbina.

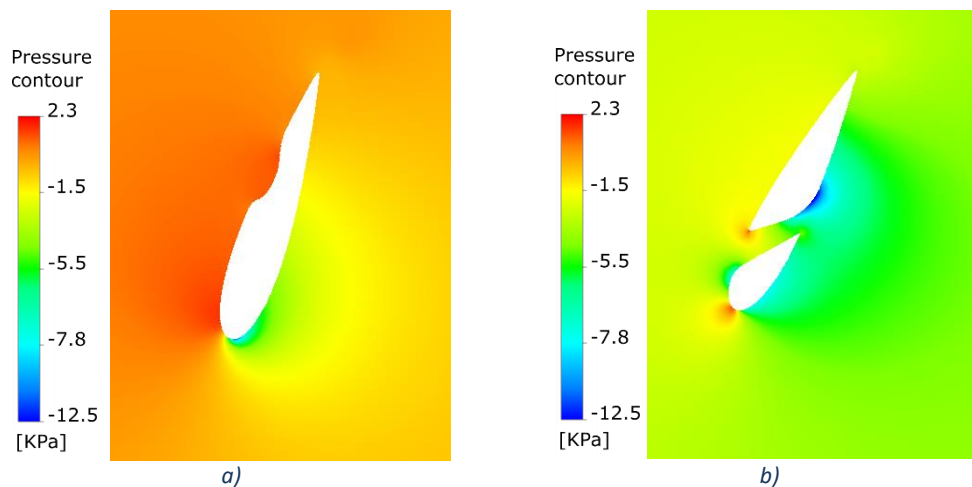


Figura 15 Diferencia de dispersión del contorno de presión en el álabe a) Caso CO con TSR de 1.5 b) Caso LEO #1 con TSR 2.5

Además, en la Figura 16 se muestran los contornos de velocidad de los casos estándar (Figura 16.a) y TEO #1 (Figura 16.b) con un TSR de 1.5. De estos gráficos podemos apreciar visualmente como se alteran los contornos de velocidad al aplicar aberturas en los álabes, específicamente en los casos de aberturas cerca del borde de fuga:

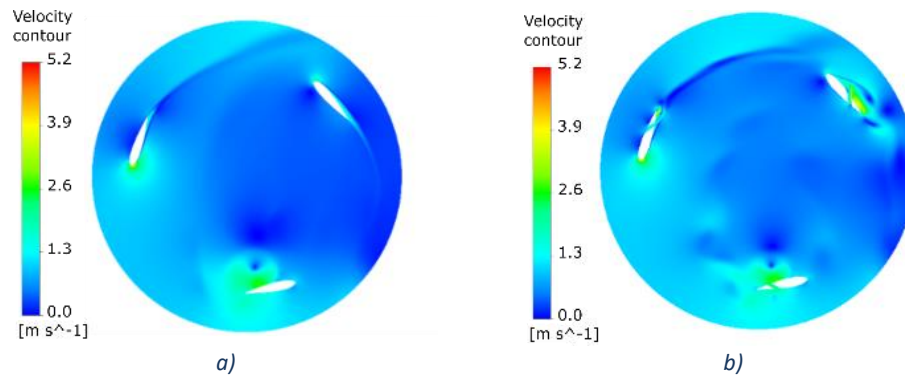


Figura 16. Contornos de velocidad para los casos a un TSR de 1.5 a) Caso Estándar b) Caso TEO #1

4.3. Efecto en el rendimiento al modificar el álabe

Para analizar y comparar el rendimiento de las modificaciones se realiza el cálculo de la eficiencia de cada caso a partir del momento promedio y la ecuación 2.1-2. La mayor eficiencia del caso estándar fue aproximadamente de 45% a un TSR de 1.5 y se estableció como referencia de comparación. La mayor eficiencia obtenida de todos los casos fue del caso CO la cual obtuvo un aproximado de 52% de eficiencia para un TSR de 1.5, lo cual representa aproximadamente un 15% de mejora con respecto al caso estándar. Los demás casos dieron una eficiencia por debajo del caso estándar, esto se puede observar en la Figura 17, en la cual se resume los resultados de la eficiencia vs el TSR, donde el eje vertical es la eficiencia en porcentaje y el eje horizontal es el TSR del sistema.

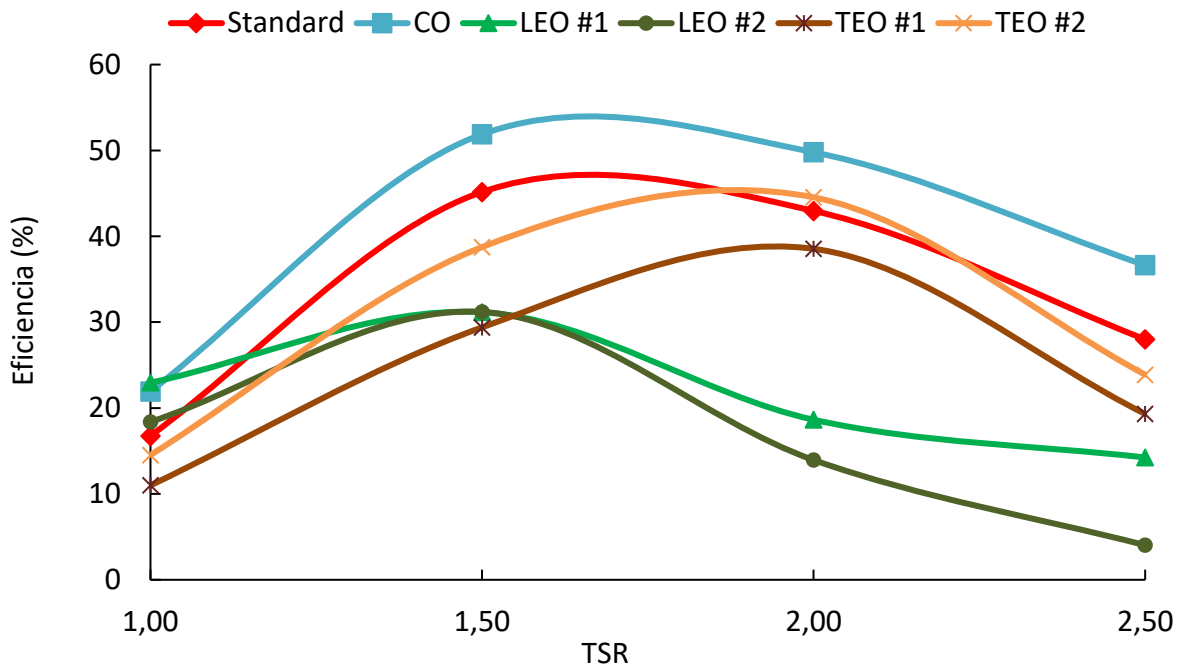


Figura 17 Eficiencia de turbina por cada TSR de cada caso

Los resultados del estudio realizado por Yousefi Roshan et al. (2021) al evaluar el caso CO presentan un comportamiento similar respecto a los resultados del estudio actual, donde su mayor eficiencia fue de un 18% del álabe con la abertura CO en la parte superior del álabe cerca del borde de fuga, sin embargo, las diferencias en resultados numéricos se atribuyen en la diferencia de parámetros de diseño como el tipo de perfil NACA, longitud de cuerda del álabe y el tamaño de abertura.

En la Figura 18, se muestran las gráficas de los coeficientes de momentos de los casos estándar y CO, estas gráficas muestran los datos obtenidos en la última revolución de la turbina. De estos gráficos se puede evidenciar inestabilidades en ambos casos para un TSR de 1.0. De las gráficas se aprecia que los coeficientes de momento netamente positivos se dan aun cuando el TSR es de 1.5 y 2, asimismo, ambos casos obtuvieron los mejores resultados de coeficiente de momento promedio a un TSR de 1.5. Por otro lado, a medida que incrementa el TSR disminuye el coeficiente de momento promedio.

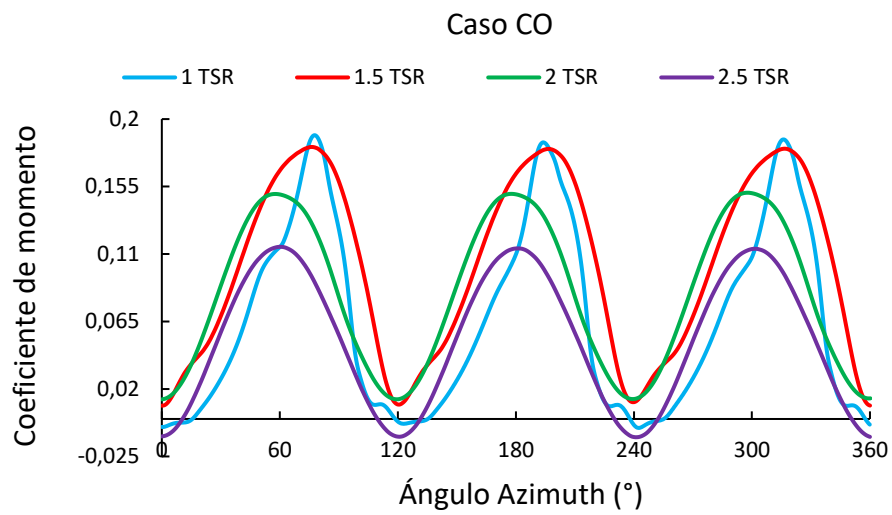
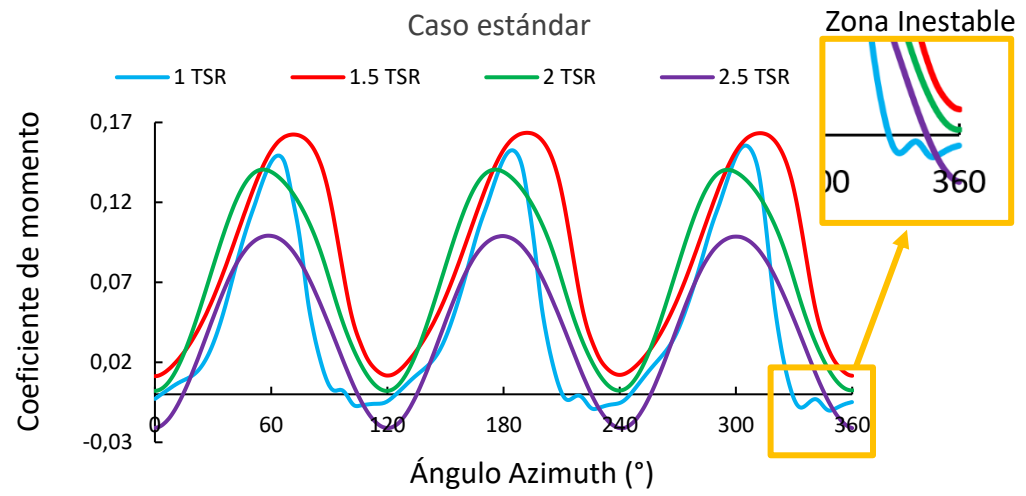


Figura 18 Graficas de coeficiente de momento a) caso estándar b) caso CO

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones

En este trabajo de grado, realizó el diseño y simulación de una turbina H Darrieus con perfiles rectos tipo NACA 0018. Se modificó el diseño geométrico de los álabes para comparar su desempeño con respecto a un caso sin modificación (caso estándar). La eficiencia del caso estándar fue de 45,16%. De todas las modificaciones la mayor eficiencia obtenida fue de 51,88% en el caso CO, lo cual significa una mejora de un 14.88% de eficiencia con respecto al caso estándar. De igual manera, el mayor promedio de coeficiente de momento netamente positivo en el caso estándar y caso CO se encuentra a un TSR de 1.5, además, a mayor TSR se logra obtener una mayor estabilidad de la turbina, pero un menor promedio de coeficiente netamente positivo.

Los casos LEO y TEO se descartan como diseños de álabes en la turbina H Darrieus debido a que presentan eficiencias por debajo del caso estándar, 31,19% y 44.54% respectivamente.

Para la mayoría de los casos de estudio se encuentra el mayor rendimiento de la turbina para un TSR de 1.5, a excepción del caso TEO, en el que la turbina obtiene su mayor rendimiento a un TSR de 2.0.

Recomendaciones

Aunque los casos LEO y TEO presenten reducción de la eficiencia para las turbinas H Darrieus, no se descarta su evaluación de rendimiento en las demás áreas de la fluido-dinámica.

Trabajos Futuros

Se propone a futuro evaluar el rendimiento de la turbina H Darrieus con la abertura CO aplicada en varios perfiles tipo NACA asimétricos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

- Alqurashi, F., & Mohamed, M. H. (2020). Aerodynamic forces affecting the H-rotor darrieus wind turbine. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1368369>
- Ansys Inc. (2013). *ANSYS ICEM CFD User 's Manual*. 15317(November), 724–746.
- Beyhaghi, S., & Amano, R. S. (2017). Improvement of Aerodynamic Performance of Cambered Airfoils Using Leading-Edge Slots. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 139(5), 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.4036047>
- Douak, M., & Aouachria, Z. (2015). Starting Torque Study of Darrieus Wind Turbine. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical, and Computer Engineering*, 9(8), 472–477.
- Dyner, I., Alvarez, C., & Cherni, J. (2005). *Energy Contribution to Sustainable Rural Livelihoods in Developing Countries: A System Dynamics Approach*.
- Fluent Inc. (2006). *Fluent 6.3 User's Guide*. 11(8), 727. [https://doi.org/10.1016/0167-4048\(92\)90125-b](https://doi.org/10.1016/0167-4048(92)90125-b)
- Furukawa, A., Watanabe, S., Matsushita, D., & Okuma, K. (2010). Development of ducted Darrieus turbine for low head hydropower utilization. *Current Applied Physics*, 10(2 SUPPL.), S128–S132. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.11.005>
- IPSE. (2022). *Caracterización ZNI*. <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-energetica-de-las-zni-ipse/>
- Julian, C., Acevedo, M., David, F., & Martinez, S. (2017). *DISEÑO DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA EL MUNICIPIO DE PISBA, BOYACÁ UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD SECCIONAL DUITAMA INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DUITAMA, BOYACÁ 2017*.
- Kirke, B. (2020). Hydrokinetic turbines for moderate sized rivers. *Energy for Sustainable Development*, 58, 182–195. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2020.08.003>
- Mohamed, M. H. (2012). Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 47(1), 522–530. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.08.044>
- Mohamed, M. H., Ali, A. M., & Hafiz, A. A. (2015). CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.08.002>
- Mohamed, O. S., Ibrahim, A. A., Etman, A. K., Abdelfatah, A. A., & Elbaz, A. M. R. (2020). Numerical investigation of Darrieus wind turbine with slotted airfoil blades. *Energy Conversion and Management: X*, 5, 100026. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2019.100026>
- Ni, Z., Dhanak, M., & Su, T. chow. (2019). Improved performance of a slotted blade using a novel slot design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 189, 34–44. <https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2019.03.018>
- Rehman, W., Rehman, F., & Malik, M. Z. (2018). A review of darrieus water turbines. *American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) POWER*, 2(March).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

<https://doi.org/10.1115/POWER2018-7547>

- Rogowski, K., Kr, G., & Bangga, G. (2021). *NACA 0018 Airfoil at Low Reynolds Number for Darrieus*.
- Sandoval, S., Duque, I., Mesa, D., & Lotero, M. (2020). *Transición energética en Colombia es una realidad*. <https://www.minenergia.gov.co/libro-transicion-energetica>
- Saryazdi, S. M. E., & Boroushaki, M. (2018). 2D numerical simulation and sensitive analysis of H-darrieus wind turbine. *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(1), 23–34. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.1.23-24>
- Vargas, J. A., Clavijo, F. V., & Torres Gómez, C. (2016). Desarrollo del prototipo de un hidrogenerador eléctrico como alternativa de generación de energía limpia en zonas rurales Development of the prototype of an electric hydro generator as an alternative for generating clean energy in rural areas. *Ingeniare*, 12(20), 91–101.
- Wardhana, W., & Fridayana, E. N. (2020). *Aerodynamic Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Darrieus Type H-Rotor using Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach*. December, 5–11. <https://doi.org/10.5220/0008542700050011>
- XM. (2022). *3.72% aumentó en febrero la demanda de energía eléctrica en Colombia - BNAmericas*. Bnamericas. <https://www.bnamericas.com/es/noticias/372-aumento-en-febrero-la-demanda-de-energia-electrica-en-colombia>.
- Yousefi Roshan, M., Khaleghinia, J., Eshagh Nimvari, M., & Salarian, H. (2021). Performance improvement of Darrieus wind turbine using different cavity layouts. *Energy Conversion and Management*, 246, 114693. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2021.114693>
- Yunus Cengel, J. C. (2006). *Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTE	<u>Arrieta Gomez Mateo</u>
FIRMA ASESORES	<u>Diego A. Hinarejos</u>
	<u>Anete Guevara M.</u>
	FECHA ENTREGA: <u>16/11/2022</u>