

Simulación Mediante CFD del Comportamiento Aerodinámico de una Turbina Para Un
Convertidor de Energía Undimotriz Columna de Agua Oscilante.

Braian Steven Rocha Padilla

Oscar Fabián Rios Alvarado

Trabajo de Grado para Optar el Título de:

Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

Ph.D. Procesos Termofluidodinámicos Aplicados a MCI

Codirector

Fabián Enrique Gonzales Esteban

Ing. Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

El presente proyecto es dedicado principalmente a Dios, por darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados, por guiarnos en toda la etapa de nuestro proyecto, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Queremos agradecerle a nuestros docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por haber compartido sus conocimientos en todo el ciclo de preparación en nuestra profesión, de manera especial, al profesor Jorge Luis Chacón director de nuestro proyecto y al codirector Fabián González quienes con su experiencia, conocimiento y motivación, nos guiaron y formaron parte de este proyecto alcanzado.

De igual manera queremos resaltar a las personas que nos han apoyado y han hecho que este proyecto se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

De mi parte Braian Steven Rocha Padilla quiero agradecer a mí familia por su comprensión y estímulo constante, además su apoyo incondicional, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron a lo largo de mis estudios.

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2.	JUSTIFICACIÓN.....	16
3.	OBJETIVOS.....	17
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4.	CUERPO DEL TRABAJO.....	18
4.1	MARCO REFERENCIAL.....	18
4.1.1	Turbinas usadas en la tecnología OWC.....	23
4.1.1.1	Turbinas Wells.....	24
4.1.1.2	Turbinas de impulso.....	27
4.1.2	Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	29
4.1.2.1	Proceso de mallado:.....	31
4.1.2.2	Condiciones de contorno:.....	32
4.1.3	Modelos de turbulencia:.....	33
4.1.3.1	Modelo de simulación numérica directa (DNS).....	34
4.1.3.2	Modelos de simulación de grandes remolinos (LES).....	34
4.1.3.3	Modelos promediados por Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS).....	34
4.1.4	Perfil aerodinámico.....	36
4.1.4.1	Series NACA.....	37
5.	METODOLOGÍA.....	38

5.1	SELECCIÓN MODELO DE TURBINA.	38
5.2	SIMULACIÓN DE MODELO SELECCIONADO.	44
5.2.1	Pre-procesamiento.....	45
5.2.1.1	Geometría.	45
5.2.1.2	Dominio computacional.....	46
5.2.1.3	Generación de malla.....	47
5.2.1.4	Tamaño y calidad.....	49
5.2.1.5	Condiciones de contorno.....	52
5.2.2	Procesamiento.....	53
5.2.2.1	Algoritmo.....	53
5.2.2.2	Modelo de turbulencia y pared.....	54
5.2.2.3	Condiciones de operación.....	55
5.2.2.4	Cálculo y convergencia.....	56
5.2.3	Post-procesamiento.....	56
5.2.3.1	Análisis de sensibilidad de la malla.....	56
5.2.3.2	Validación del modelo.....	57
5.3	PROPÓSITO DEL MODELO.....	60
5.3.1	Diseño de la turbina.....	62
5.3.2	Tamaño y calidad de malla del nuevo diseño.....	65
5.3.3	Condiciones de operación del nuevo diseño.....	68
5.3.4	Cálculo de potencia extraída.....	73
6.	CONCLUSIONES.....	75
7.	SUGERENCIAS INVESTIGACIONES FUTURAS.....	77

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rango de valores de simetría y ortogonalidad recomendados para ICEM de Ansys. ...	36
Tabla 2. Tabla comparativa de los modelos de turbinas encontrados en la literatura.....	39
Tabla 3. Especificaciones de la turbina a validar.....	45
Tabla 4. Tamaño de la malla representada en nodos y elementos.	49
Tabla 5. Parámetros de oblicuidad y ortogonalidad para las distintas mallas.....	49
Tabla 6. Velocidades de entrada, para cada coeficiente de caudal.	53
Tabla 7. Parámetros de operación.	55
Tabla 8. Tabla comparativa de los valores de eficiencia, coeficiente de presión y torque.	59
Tabla 9. Especificaciones de la nueva turbina Wells.....	64
Tabla 10. Parámetros de operación de la turbina Wells.....	70
Tabla 11. Coeficientes de torque, presión y eficiencia según el coeficiente de flujo.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo mundial de energía a través de los años.....	19
Figura 2. Tendencia en la generación de energía eléctrica.	20
Figura 3. Clasificación de captadores de energía según su ubicación.	22
Figura 4. Representación sistema OWC.....	23
Figura 5. Clasificación de las turbinas de aire.	24
Figura 6. Representación de una turbina tipo Wells.	24
Figura 7. Representación de una turbina Wells con corona directriz.....	25
Figura 8. Representación de una turbina Wells con control de inclinación.....	25
Figura 9. Representación de una turbina Wells con doble rotor.....	26
Figura 10. Representación de una turbina Wells con doble rotor contra rotante.....	27
Figura 11. Representación de una turbina axial con directrices móviles.....	27
Figura 12. Representación turbina Mc Cormick.....	28
Figura 13. Representación turbina de impulso radial.....	28
Figura 14. Representación de la turbina radial con aletas orientables.....	29
Figura 15. Diagrama metodológico para CFD.....	30
Figura 16. Ejemplo de malla estructurada.....	31
Figura 17. Ejemplo de malla no estructurada.	32
Figura 18. Nomenclatura de un perfil alar.....	36
Figura 19. Ejemplo perfil NACA.....	38
Figura 20. Diagrama de flujo para el modelo de turbina.....	39
Figura 21. Comparación eficiencia coeficiente de flujo para turbinas Wells y de impulso.	42
Figura 22. Velocidades y fuerzas sobre perfil aerodinámico de una turbina Wells.....	43

Figura 23. Perfil NACA 0015.....	44
Figura 24. Diagrama de flujo de validación del modelo seleccionado.....	44
Figura 25. Plano de diseño de la turbina Wells (unidades en mm).	45
Figura 26. Dominio computacional	47
Figura 27. Malla estructurada tipo H.....	48
Figura 28. Malla del perfil y ducto del dominio computacional.	48
Figura 29. Calidad de la oblicuidad.....	50
Figura 30. Calidad ortogonal.	51
Figura 31. Condiciones de contorno del dominio computacional	52
Figura 32. Gráfica de variación para las ecuaciones $k-\omega$ y $k-\varepsilon$ en el dominio.	55
Figura 33. Especificaciones CPU y tarjeta gráfica ordenador Acer propio.....	56
Figura 34. Independencia de malla para un coeficiente de flujo $U^*=0.225$	57
Figura 35. Coeficiente de torque.....	58
Figura 36. Coeficiente de presión.....	59
Figura 37. Eficiencia.....	59
Figura 38. Dispositivo OWC-MDS	61
Figura 39. Modelo físico del convertidor OWC-MDS con sensores de presión.....	62
Figura 40. Esquema del diseño propuesto del dispositivo MDS.....	63
Figura 41. Geometría del ducto para el diseño de la turbina	63
Figura 42. Plano del nuevo diseño de la turbina Wells (unidades en mm).....	65
Figura 43. Malla del perfil y ducto del dominio computacional del nuevo diseño.	66
Figura 44. Calidad de la oblicuidad del nuevo diseño.....	67
Figura 45. Calidad ortogonal del nuevo diseño.....	68

Figura 46. Comportamiento de la velocidad en la cámara de resonancia del OWC-MDS	69
Figura 47. Comportamiento de la presión en la cámara de resonancia del OWC-MDS	69
Figura 48. Coeficiente de torque del nuevo diseño.	72
Figura 49. Coeficiente de presión del nuevo diseño.	72
Figura 50. Eficiencia del nuevo diseño.	73

RESUMEN

Título: Simulación Mediante CFD del Comportamiento Aerodinámico de una Turbina Para Un Convertidor de Energía Undimotriz Columna de Agua Oscilante.*

Autores: Braian Steven Rocha Padilla

Oscar Fabián Rios Alvarado**

Palabras Clave : Energía undimotriz, columna de agua oscilante, turbinas de aire, CFD

Descripción :

En la actualidad y debido a la importancia de encontrar nuevas alternativas para la obtención de energía se han desarrollado nuevas tecnologías, una de ellas es el aprovechamiento de la energía undimotriz a través de convertidores de columna de agua oscilante (OWC). Este tipo de convertidor se caracteriza por trabajar de manera sumergible y por utilizar el movimiento de las olas para crear un flujo de aire bidireccional que se ve obligado a pasar a través de una turbina. Esto tiende a ser una característica fundamental a la hora del diseño de la turbina, debido a que requiere una configuración especial.

Teniendo en cuenta los problemas mencionados anteriormente este trabajo de investigación presenta un análisis acerca de los diferentes tipos de turbinas de aire para la obtención de energía de las olas, utilizadas actualmente de flujo axial y algunos tipos básicos como la turbina de impulso; Además se desarrolló una simulación numérica de una configuración de turbina tipo Wells y se estudió el comportamiento fluido dinámico en el convertidor OWC-MDS.

Las simulaciones se han realizado utilizando el software CFD ANSYS, el cual resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds junto con el modelo de turbulencia K-w

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Jorge Luis Chacón Velazco, PhD.

shear stress transport (SST). Este método de solución nos arrojó valores en términos de eficiencia, torque y presión, los cuales fueron utilizados para validar el modelo seleccionado y comparar la configuración propuesta del convertidor OWC-MDS.

ABSTRACT

Title: Simulation by means of CFD of the Aerodynamic Behavior of a Turbine for a Wave Energy Converter Oscillating Water Column.*

Authors: Braian Steven Rocha Padilla

Oscar Fabián Rios Alvarado**

Key words: Wave energy, Oscillating water column, Air turbines, CFD.

Descriptions :

Currently and due to the importance of finding new alternatives for obtaining energy, new technologies have been developed, one of them is the use of wave energy through oscillating water column converters (OWC). This type of converter is characterized by working in a submersible way and by using the movement of the waves to create a bidirectional air flow that is forced to pass through a turbine. This tends to be a critical feature when designing the turbine, as it requires a special configuration.

Taking into account the problems mentioned above, this research paper presents an analysis of the different types of wind turbines for wave energy conversion, currently used axial flow and some basic types such as the impulse turbine; In addition, a numerical simulation of a Wells type turbine configuration was developed and the fluid dynamic behavior in the OWC-MDS converter was studied.

The simulations have been carried out using the ANSYS CFD software, which solves the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations together with the K-w shear stress transport (SST) turbulence model. This solution method gave us values in terms of efficiency, torque and pressure,

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Director Jorge Luis Chacón Velazco, PhD.

which were used to validate the selected model and compare the proposed configuration of the OWC-MDS converter.

INTRODUCCIÓN

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad el mundo busca nuevos métodos para desarrollar e implementar diferentes maneras de generar electricidad sin depender de los derivados del petróleo. Hasta el momento se ha logrado estimar que la potencia existente en un oleaje promedio es suficiente para tenerlo en cuenta como una de las formas de generación de energía con fuentes no convencionales. No obstante, este tipo de aprovechamiento energético presenta una dificultad, debido a que se manifiesta de forma bastante dispersa, y para poder aprovecharla es necesario recurrir a diversos dispositivos.

“El potencial teórico para la generación de electricidad difiere entre tecnologías, con el potencial agregado para todas las tecnologías de energía oceánica combinadas que van desde 45 000 teravatios-hora (TWh) hasta muy por encima de 130 000 TWh por año. Esto significa que la energía oceánica podría cubrir hasta el doble de la demanda mundial actual de electricidad.” (IRENA, 2020).

Actualmente en Colombia la costa atlántica presenta los mayores niveles de potencial oceánico y gracias a investigaciones realizadas en (Perez Zapata, 2018), se puede establecer un potencial energético de energía Undimotriz que oscila en 1.107 MW para aplicaciones de tecnologías “near shore”, esto con el fin de estudiar a fondo los diferentes dispositivos usados en la obtención de la energía proveniente de las olas, e implementar un método de captación de energía funcional en la costa atlántica colombiana.

Los dispositivos de aprovechamiento de energía, que se almacena en las olas, deben captar la energía cinética y potencial para convertirla en energía útil, ya sea mecánica o eléctrica. Además,

estos tienen que ser idóneos para resistir los diferentes comportamientos del mar y funcionar eficientemente.

La tecnología OWC es de los convertidores de energía undimotriz más utilizados actualmente, ya que, basa su funcionamiento en aprovechar energía neumática para generar energía mecánica, éste utiliza la oscilación del agua dentro de una cámara semi-sumergida y abierta por debajo del nivel del mar, y debido al oleaje se produce un cambio de presión por encima del agua y dentro del convertidor, obteniendo un flujo de aire que se puede aprovechar usando una turbina.

Uno de los principales problemas de las centrales OWC ha sido que el flujo de aire producido dentro de la cámara es bidireccional, de acuerdo con la oscilación del agua. (Manuel García Díaz, 2016). Los intentos para generar una rotación mecánica unidireccional, son utilizar sistemas de válvulas rectificadoras y turbinas convencionales o turbinas auto-rectificadoras y así resolver los inconvenientes de tener un flujo que cambia de dirección.

Para resolver este tipo de inconvenientes en el flujo de los OWC, es importante determinar. ¿Qué tipo de turbina es apropiada para un convertidor undimotriz que utiliza tecnología OWC? Y ¿Cómo es su comportamiento mediante la modelación numérica CFD?

2. JUSTIFICACIÓN

La energía es un factor esencial en el crecimiento de la sociedad, existiendo dos desafíos a resolver: el recurso y la tecnología asociada. Hoy en día se estima la pérdida de los recursos tradicionales y el reto es explotar los recursos que no se utilizan a gran escala, para ello surge la necesidad de desarrollar las tecnologías que permitan un avance sostenible.

Una fuente de recursos casi inagotables se presenta de formas distintas en los océanos ya sea a través de mareas, corrientes marinas, gradiente térmico, gradiente salino y olas (undimotriz). Es aquí donde la energía undimotriz se establece como una de las energías denominadas "energías alternativas" o "energías renovables" más relevantes, esta se produce gracias al movimiento de las olas. Algunos factores importantes a tener en cuenta son el de determinar cuanta energía es capaz de acumular una ola, y las características teóricas y físicas que presenta, para así poder garantizar no solo un buen entendimiento, sino una buena eficiencia de nuestros mecanismos y sistemas a desarrollar.

“Los convertidores de energía son los mecanismos capaces de aprovechar el oleaje para obtener energía útil y al mismo tiempo funcionar de manera eficiente en las diferentes amplitudes y frecuencias que se presentan en las condiciones adversas del mar.” (Gutierrez, 2016).

El presente proyecto se enfocará en estudiar la simulación de una turbina para un convertidor de energía undimotriz OWC por medio de CFD, ya que es una herramienta útil al momento de analizar el comportamiento del flujo de fluidos, lo cual es un factor de gran importancia para determinar el desempeño de la turbina utilizada en el convertidor, bajo parámetros como eficiencia, presión y torque. Este sistema está destinado al producción de la energía contenida en el movimiento de las olas dando a conocer otras alternativas diferentes para la generación de energía limpia y renovable.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una turbina para un convertidor de energía undimotriz OWC, utilizando modelación numérica CFD.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar un modelo de turbina para un convertidor de energía undimotriz tipo OWC, mediante el estudio de diferentes modelos propuestos en la literatura.
- Simular el modelo seleccionado mediante CFD y validar con datos existentes en la literatura.
- Diseñar una turbina para la tecnología OWC-MDS mediante sistemas CAD, utilizando como base el modelo seleccionado.

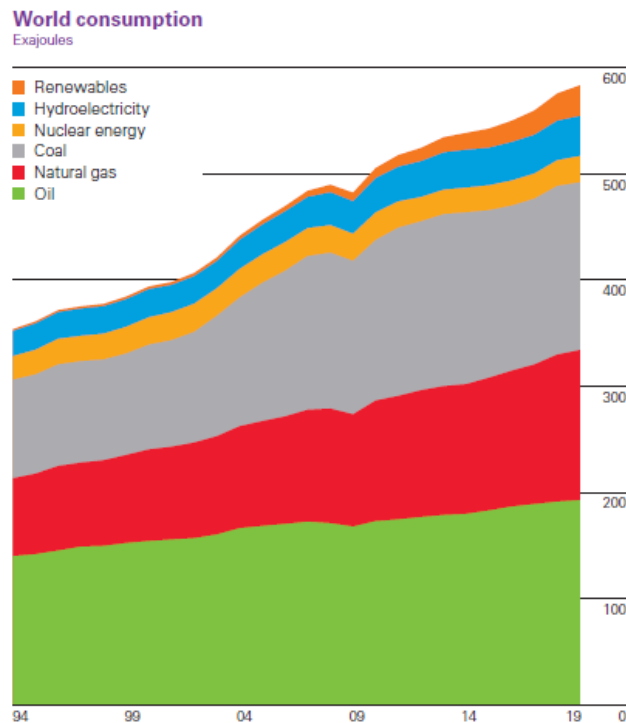
4. CUERPO DEL TRABAJO

4.1 MARCO REFERENCIAL

La energía según algunas definiciones es, “la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo. Esta se puede representar de formas muy diversas: gravitatoria, cinética, química, eléctrica, magnética, nuclear, radiante, etc.” (Schallenberg et al., 2008)

La energía que usamos hoy en día la obtenemos de tres grandes fuentes: el sol, la materia fósil y los procesos nucleares. De éstas, la única que se cataloga como energía reutilizable es la solar, y del mismo modo se derivan en muchas bifurcaciones ya sea eólica, hidráulica, marítima, radiación solar, entre otras, aunque la materia fósil es energía solar concentrada, es un recurso que no podemos reutilizar, por tanto es catalogada como energía no renovable.

En la mayor parte de la historia del hombre se ha usado la energía renovable como método de desarrollo, no fue sino hasta la aparición de la revolución industrial en 1760, donde se abrió una brecha gigante entre la energía proveniente del sol y la de productos fósiles, esta última desplazando casi por completo a la renovable.

Figura 1. Consumo mundial de energía a través de los años.

(BP, 2020)

El incremento desproporcionado en el uso de las energías fósiles no renovables provocó un cambio dramático en los ecosistemas y medio ambiente, ya que se produce una elevación de gases contaminantes como el CO₂, que causa un fenómeno denominado efecto invernadero, esto hace retener el calor en la atmosfera terrestre, y como consecuencia se producen los cambios climáticos. Pero no solo están los problemas ambientales, las reservas de combustible fósil no son inagotables, y debido a su uso desmedido, cada vez se agotan a un ritmo mucho mayor.

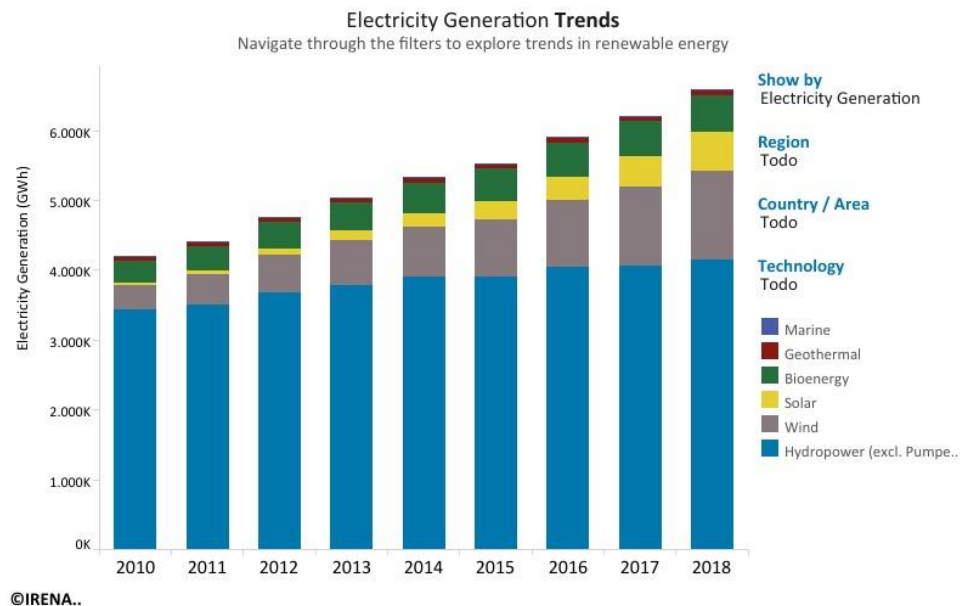
“Como es bien sabido, las reservas de combustible fósil son limitadas, y el ritmo de consumo del ser humano es muy elevado, llegando a utilizar en un año la producción de un millón de años de la naturaleza” (*Consecuencias del Uso de Combustibles Fósiles / Twenergy, n.d.*).

Debido a esto, países en desarrollo se han visto en la necesidad de implementar nuevos métodos de captación de energía, las llamadas energías renovables o alternativas. Estas tienen bajo impacto

ambiental, son una fuente de energía inagotable, además de tener una mayor capacidad energética que la de los productos fósiles, el verdadero problema se encuentra en la captación de esta energía.

“la aportación de las energías alternativas continua en constante crecimiento alcanzando hasta un 72% en 2019. Así mismo aumenta la capacidad de generación de un 33.3% en 2018 a 34.7% en 2019. Sin embargo, estas energías alternativas todavía representaron al menos el 70% del crecimiento total de la capacidad en casi todas las regiones en 2019”.(IRENA – *International Renewable Energy Agency*, n.d.).

Figura 2. *Tendencia en la generación de energía eléctrica.*



(IRENA – *International Renewable Energy Agency*, n.d.)

Un ejemplo claro de la energía inagotable que son las energías alternativas es el mar. Aproximadamente el 80% de la superficie de la tierra está conformada por océanos, los cuales tienen una gran cantidad de energía almacenada, ya sea en sus olas, las corrientes de aire, la marea, la salinidad y temperatura. Pero aprovechar la energía de los océanos no es nada nuevo, países

como Noruega o Escocia en los años 1985 instalaron una planta en donde combinaban el sistema OWC con uno propio.

La central undimotriz de Mutriku, es quizá una de las plantas más representativas de recolección de energía undimotriz, se inauguró en julio de 2011 en España, y es la primera planta comercial de este tipo a nivel mundial. Implementa el principio de funcionamiento OWC y cuenta con 16 turbinas que inicialmente serían capaces de producir 600 MW/h al año, pero según estudios realizados esta expectativa de producción sería mucho más baja.

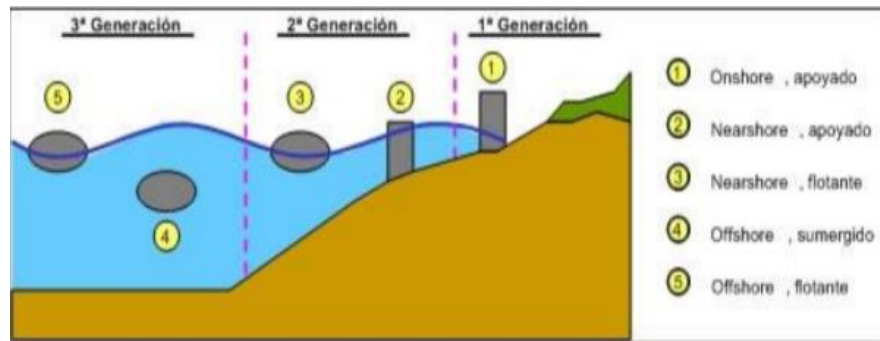
“Centrales de energía que aprovechan la energía undimotriz como la central Mutriku se inauguró realizando una estimación de producción anual de hasta 600.000 kWh. Sin embargo problemas que ocurren llevando a cabo el proyecto a la aplicación real, hace que la capacidad de la central sea significativamente más baja llegando sólo hasta un 62% de lo proyectado inicialmente. Además por problemas de diseño 2 de las 16 cámaras quedaron inoperativas desde el inicio, y debido al mantenimiento solo 10 turbinas han estado trabajando eficientemente. Todos estos inconvenientes a la hora del desarrollo del proyecto hacen que la producción anual solo alcance el 41% de las estimaciones iniciales.” (Ibarra Berastegi et al., 2018)

En este sentido se puede determinar que la energía undimotriz aún no es muy rentable, debido al bajo desarrollo tecnológico, al movimiento no lineal de las olas y la resistencia que estas ofrecen. Es por eso que este tipo de mecanismos de captación de energía aún no es competitivo comercialmente, pero cabe resaltar que el impacto ambiental es muy bajo.

Otro factor muy importante a tener en cuenta para que sea óptimo su uso es la correcta localización. Estos se clasifican según la profundidad a la que se encuentren, pueden ser dispositivos en costa

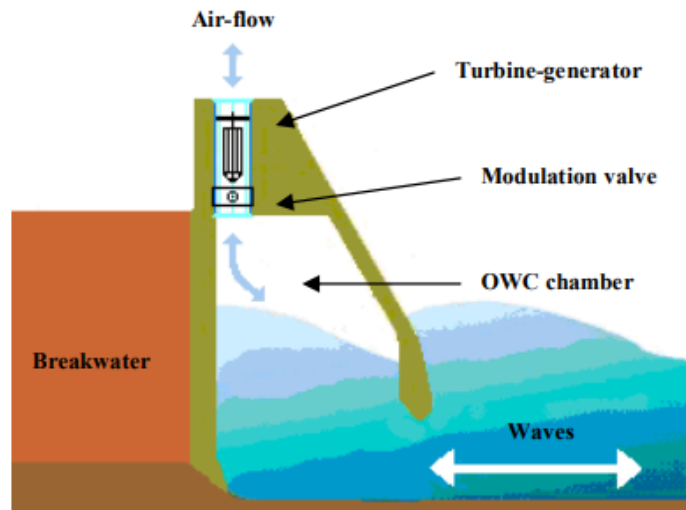
(on-shore), dispositivos cerca de la costa (near-shore) o estos dispositivos fuera de la costa (off-shore).

Figura 3. Clasificación de captadores de energía según su ubicación.



(File:Clasificación de captadores de energía de las olas según su ubicación.PNG - Wikimedia Commons, n.d.)

“La tecnología OWC es uno de los sistemas de convertidores de energía undimotriz más relevantes actualmente. Consta de una estructura semi-sumergida ubicada en la costa marítima la cual capta la energía entregada por la ola formando una cámara de aire que sube y baja su nivel haciendo circular un flujo de aire de forma bidireccional. Utilizando una turbina de flujo bidireccional, se puede aprovechar este accionar neumático de la cámara, y así transformar la energía de las olas en energía útil..” (Manuel García Díaz, 2016)

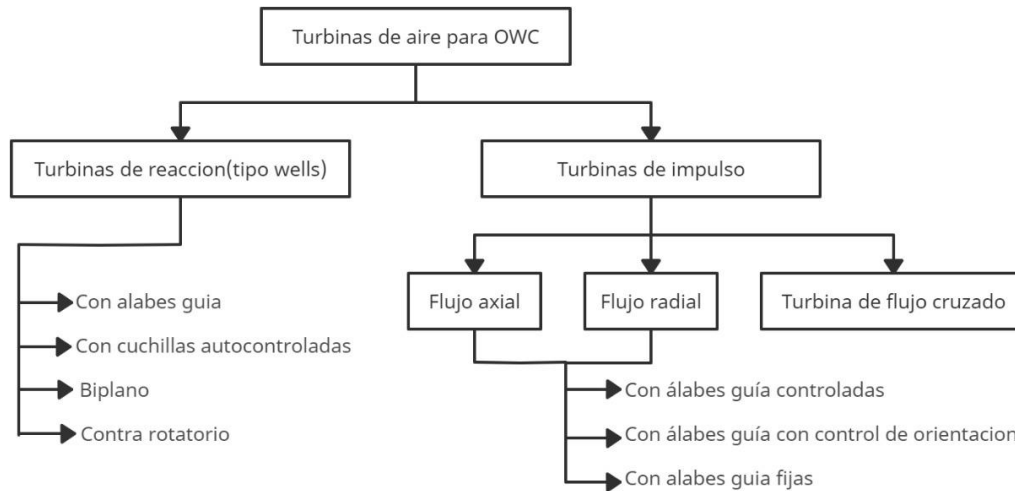
Figura 4. *Representación sistema OWC*

(Amundarain Ormaza, 2012)

Como se ha mencionado anteriormente, estos sistemas manejan una condición de flujo bidireccional, lo que hace que los métodos para capturar esa energía sea a través de turbinas especiales, un ejemplo de ello son las turbinas tipo Wells y las turbinas de impulso, con este tipo de turbinas no importa la dirección del flujo, siempre van a girar en un mismo sentido.

4.1.1 Turbinas usadas en la tecnología OWC.

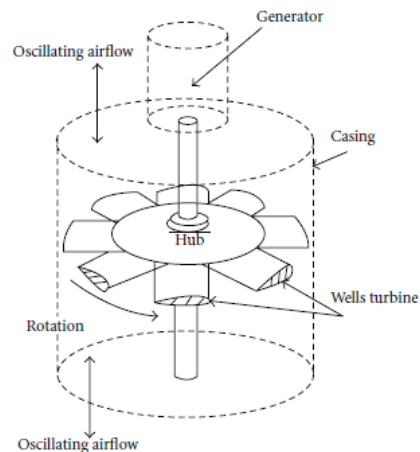
Cómo se había mencionado anteriormente en la implementación de la tecnología OWC, existen dos tipos principales de turbinas: las turbinas de impulso y turbinas Wells.

Figura 5. Clasificación de las turbinas de aire.

(Tapas, 2017)

4.1.1.1 Turbinas Wells

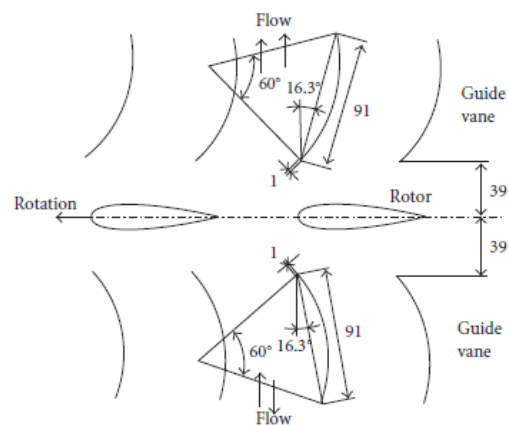
Este tipo de turbina tiene como característica principal álabes aerodinámicos simétricos que se posicionan con un ángulo recto al flujo de aire. Gracias a la geometría, esta turbina mantiene un mismo sentido de giro sin importar la dirección del flujo ya que mantiene la resultante de las fuerzas de sustentación y arrastre perpendiculares a la velocidad relativa del flujo.(Rios & Rocha, n.d.)

Figura 6. Representación de una turbina tipo Wells.

(Takao, 2012)

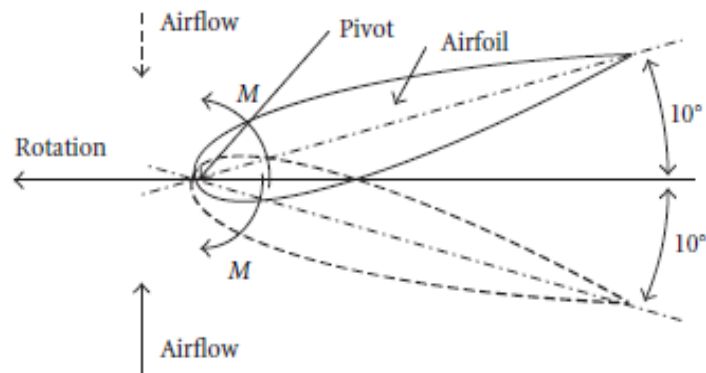
Para optimizar el ángulo de ataque en este tipo de turbinas, se implementan algunos dispositivos que permiten modificar la inclinación en la dirección del flujo, llamadas paletas guía figura 7. También se implementa un conjunto aerodinámico en un cierto ángulo de incidencia que genera el momento de cabeceo M alrededor de un pivote, las palas de la turbina pueden oscilar entre dos ángulos de ajuste por sí mismas de acuerdo con la dirección del flujo, como se muestra en la figura 8.

Figura 7. Representación de una turbina Wells con corona directriz



(Takao, 2012)

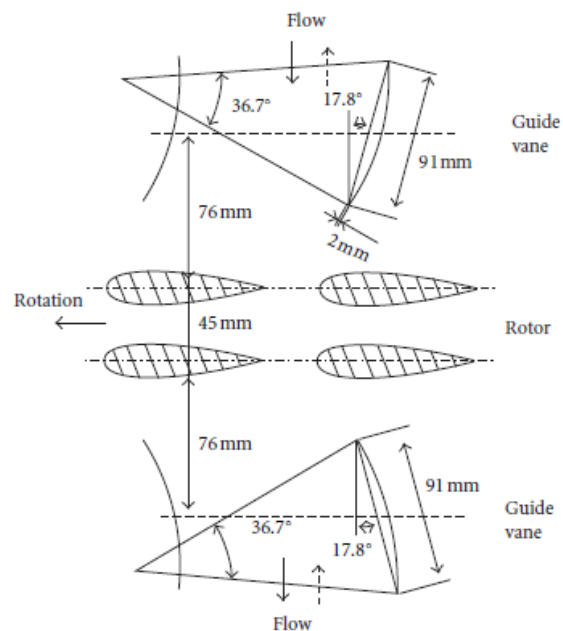
Figura 8. Representación de una turbina Wells con control de inclinación



(Takao, 2012)

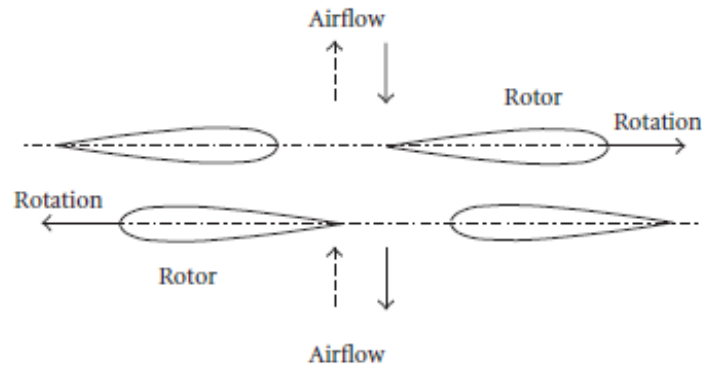
También hay turbinas Wells de doble rotor que giran en la misma dirección, como se muestra en la figura 9, Esta turbina está instalada en la planta OWC Islay, U.K. Donde las paletas guía no se utilizan en la turbina.

Figura 9. Representación de una turbina Wells con doble rotor.



(Takao, 2012)

Por último se puede encontrar turbinas Wells contra rotantes representada en la figura 10. Turbinas de este tipo están instaladas en LIMPET, Islay, Reino Unido, la cual, es la primera central de energía de olas comercial del mundo donde se implementó este sistema, (capacidad de 500 kW, diámetro de turbina de 2,6 m), 2 turbinas, NACA0012, 7 palas por rotor).

Figura 10. Representación de una turbina Wells con doble rotor contra rotante.

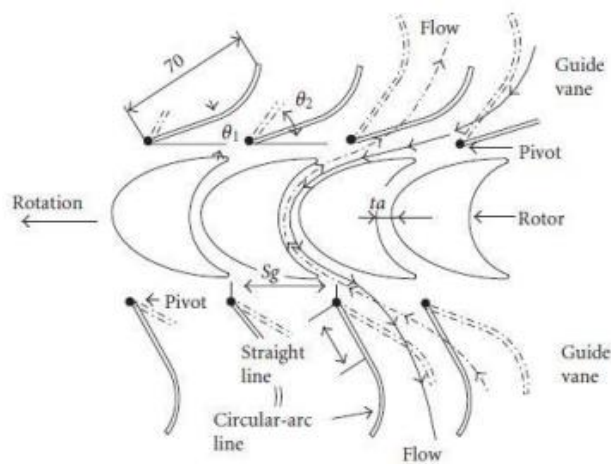
(Takao, 2012)

4.1.1.2 Turbinas de impulso.

Este tipo de turbinas suele ser una buena alternativa a las turbinas Wells, ya que generan menos ruido y son más eficientes, el problema en estas reside en la dificultad de diseño y en su construcción.

Las turbinas de impulso pueden ser tanto radiales como axiales. Una turbina axial presenta una entrada y salida de flujo que circula en una misma dirección a través del rodete, mientras la turbina radial el flujo entra en una dirección y cambia su sentido de forma radial a la salida.

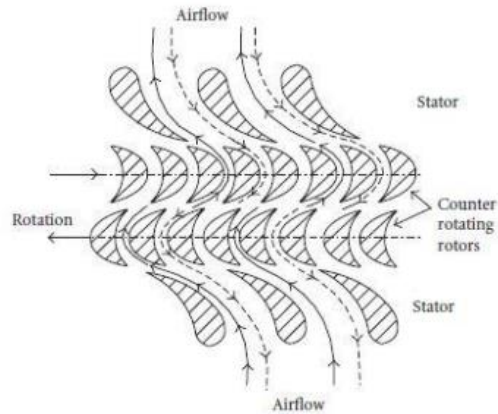
Turbinas de tipo axial, al igual que las Wells presenta variaciones con aletas directrices.

Figura 11. Representación de una turbina axial con directrices móviles

(Takao, 2012)

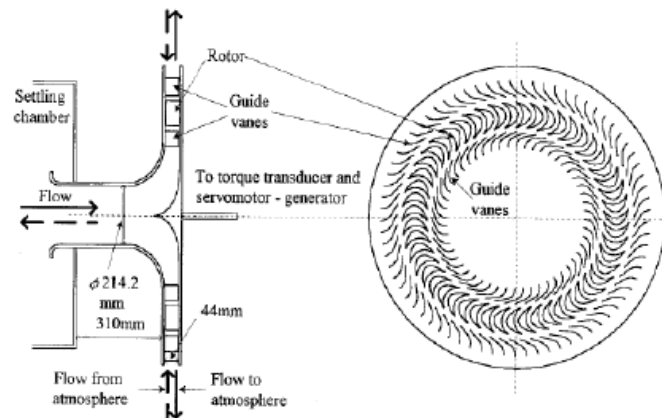
Turbina de impulso radial, al igual que las demás tipos de turbinas, las radial presentan variaciones en sus álabes con directrices orientables, fijas o del tipo Mc Cormick que cuentan con alabes contra rotantes.

Figura 12. Representación turbina Mc Cormick

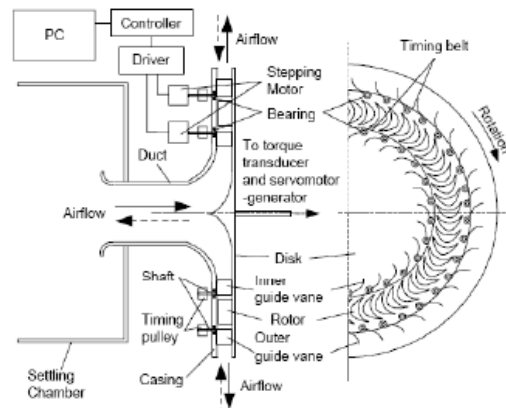


(Takao 2012)

Figura 13. Representación turbina de impulso radial



(Setoguchi, y otros, 2002).

Figura 14. Representación de la turbina radial con aletas orientables

(Setoguchi, y otros, 2002).

4.1.2 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

“La Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluids Dynamics* en inglés), es una rama enfocada en la física de los fluidos, la cual se desarrolla mediante métodos numéricos y abarca temas como la transferencia de calor, conservación de masa, cantidad de movimiento, turbulencia entre otros.”(Vega, 2011)

Los procesos en la dinámica de fluidos computacional están determinados por aproximaciones variables, las cuales se denominan discretización de flujo, es decir que las variables de campo del fluido se acercan en puntos llamados nodos. Para resolver estos sistemas discretos debemos utilizar ecuaciones algebraicas, que cuando se resuelven se obtienen los valores de todos los nodos.

Ahora bien, debemos tener en cuenta las etapas de la simulación en CFD:

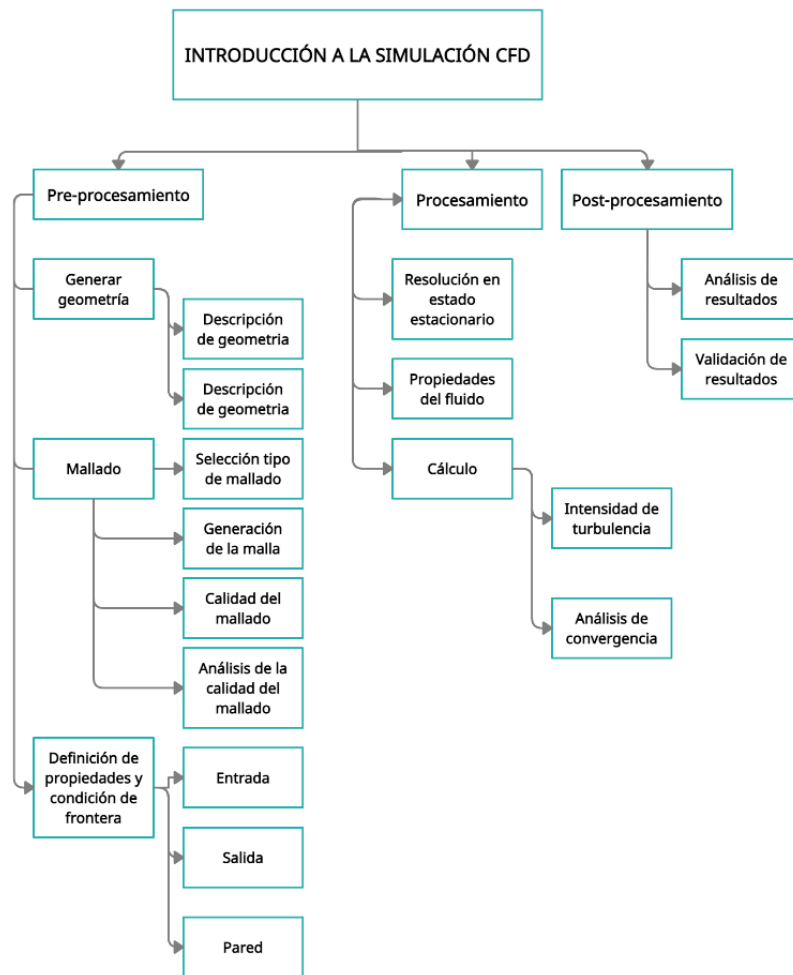
Preprocesamiento: en esta etapa se define una geometría física, se realiza un proceso de mallado (puede ser estructurada o no estructurada), se definen las condiciones de contorno iniciales y las ecuaciones que la gobiernan.

Procesamiento: en esta etapa se inicia el proceso de simulación y las ecuaciones empiezan a resolverse, en este punto normalmente requerimos un alto costo computacional, ya que el

algoritmo numérico debe integrar las ecuaciones que rigen el flujo del fluido en los volúmenes de control del dominio, debe discretizar el resultado dentro del sistema de ecuaciones algebraicas, y resolver las ecuaciones algebraicas por métodos iterativos.

Postprocesamiento: utilizamos el postprocesamiento para observar los resultados que nos arroja la simulación, dominios de geometría, vectores, graficas, entre otras.

Figura 15. Diagrama metodológico para CFD.



(Orozco-cantos & Pozo-safla, 2018)

Para poder solucionar cualquier problema mediante el uso de CFD debemos poner especial atención en la etapa de Preprocesamiento, se debe definir correctamente el tipo de mallado, las

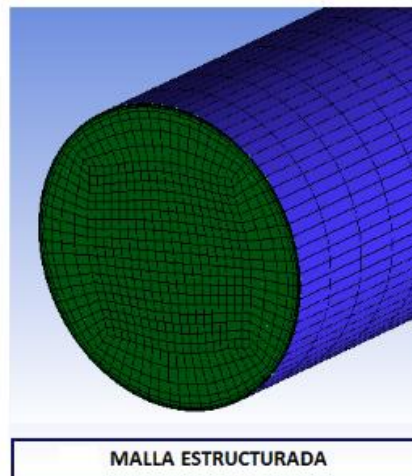
condiciones de contorno y el modelo de turbulencia, ya que son factores importantes para obtener resultados confiables.

4.1.2.1 Proceso de mallado:

Como se había mencionado anteriormente el tipo de mallado se divide en dos partes, estructurado y no estructurado:

Malla estructurada: Este tipo de malla se utiliza principalmente cuando se tienen geometrías simples, donde se puede dividir ordenadamente cada celda ya sea cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D, pueden clasificarse en ortogonales cuando las líneas que la configuran se cortan en ángulos de 90° o no ortogonales cuando se cortan en ángulos distintos.

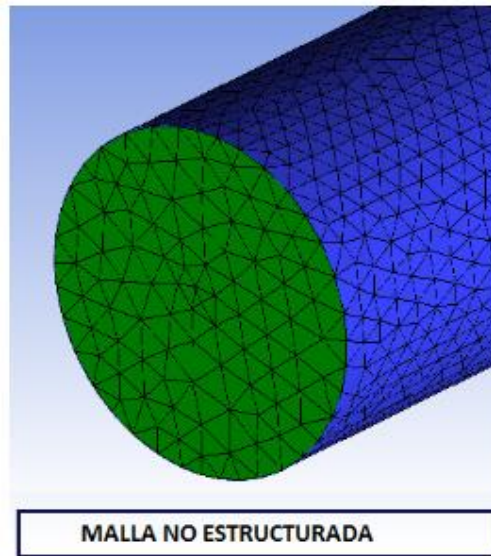
Figura 16. *Ejemplo de malla estructurada*



(Utrilla Noriega, n.d.)

Malla no estructurada: Las mallas no estructuradas son ideales cuando se tienen objetos con geometrías complejas, ya que adoptan formas Tetraédricas y Hexaédricas al dividir la región de dominio. En este tipo de mallado se hace indispensable determinar adecuadamente los parámetros de la malla para que sea de calidad.

Figura 17. *Ejemplo de malla no estructurada.*



(Utrilla Noriega, n.d.)

4.1.2.2 Condiciones de contorno:

En la aerodinámica hay una práctica general que es imponer valores iniciales de flujo libre en velocidad, la presión, la densidad y la temperatura, ya que, ayuda a que la simulación llegue a la convergencia de la solución.

Algunas condiciones se pueden especificar en:

Condiciones de entrada. En este tipo de condiciones se suele determinar la velocidad de entrada del flujo.

Condición de salida. Este tipo de condición suele establecerse cuando se tiene una velocidad de salida estable, donde la geometría del objeto no afecta en nada la dirección del flujo.

Condición de pared. Se establece esta condición de frontera cuando se tiene un flujo confinado, donde las condiciones de no deslizamiento afectan la velocidad del fluido.

Condición de revolución. Se utiliza normalmente en tubería, ya que los ejes de revolución de flujo y la tubería coinciden para un determinado radio.

4.1.3 Modelos de turbulencia:

Los modelos de turbulencia se rigen principalmente por las ecuaciones de Navier-Stokes, la cual al ser demasiado compleja, es necesario recurrir a software que resuelvan este tipo de modelos.

Una pequeña variante en coordenadas cartesianas y para flujo incompresible es:

Ecuación de continuidad de flujo incompresible.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Componente X de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible.

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

Componente Y de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible.

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

Componente Z de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible.

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

Para resolver las ecuaciones que gobiernan el sistema es importante seleccionar el modelo de turbulencia apropiado, para ello se mencionaran los modelos más usados y comunes en la solución de los problemas de CFD en ANSYS (Andrés et al., 2015).

4.1.3.1 Modelo de simulación numérica directa (DNS).

Direct Numerical Simulation (DNS), este modelo resuelve las ecuaciones de Navier - Stokes en las características de turbulencia de forma directa, es por ello que se caracteriza por ser tan preciso en los resultados obtenidos. Debido a esto el nivel computacional que necesita es bastante elevado ya que el tamaño de celda debe ser demasiado pequeño, es por esto que el DNS debe ser aplicado en geometrías muy simples y a bajos números de Reynolds.

4.1.3.2 Modelos de simulación de grandes remolinos (LES)

Large Eddy Simulations (LES), este modelo se resuelve a escalas grandes con las ecuaciones de gobierno del fluido, y en las pequeñas asume un modelo que considera una variación aproximada en los parámetros del flujos. El modelo LES emplea funciones de filtrado de tipo espacial y frecuencial. De acuerdo al método de filtrado y a la forma de cierre este modelo se divide en submodelos:

- Submodelo de smagorinsky.
- Submodelo de similaridad de escala.
- Submodelo dinámico de germano.
- Submodelo de función estructural.

4.1.3.3 Modelos promediados por Reynolds de las ecuaciones de Navier- Stokes (RANS).

Resolver problemas de turbulencia a través de las ecuaciones de Navier Stokes es muy complicado, sin embargo Osborne Reynolds propuso un concepto de solución utilizando términos de campo de flujo promedio y así eliminar las fluctuaciones de la turbulencia, la idea de este modelo es realizar un vínculo entre las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes y las tensiones de Reynolds, esto requiere una potencia informática bastante elevada, ya que la magnitud de las incógnitas es grande

y puede producir errores con un margen alto, a pesar de esto, los modelos RANS ofrecen un buen equilibrio entre potencia informática y precisión que se requiere en las aplicaciones industriales.

Actualmente hay diferentes métodos para solucionar los modelos RANS, enfocados en determinar el valor de coeficiente de viscosidad, los cuales se dividen en grupos:

Modelo de cero ecuaciones. Este modelo no utiliza ninguna ecuación adicional, algunos de ellos son los modelos de longitud mezclada de Prandtl, el modelo de Baldwin-Lomax y el modelo de Cebeci-Smith.

Modelos de una ecuación. Un ejemplo de este modelo es el de Prandtl-Kolmogorov el cual incorpora una ecuación de dependencia para determinar el coeficiente de viscosidad a través de la energía cinética de gobierno del fluido. Otros modelos son los de Bladwin-Brath y el modelo Spalart-Allmaras.

Modelos de dos ecuaciones. Este tipo de modelos son los más usados y populares dentro de los modelos RANS, donde los más usados y frecuentes son los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$. Estos modelos emplean un sistema de dos ecuaciones de balance, los cuales relacionan la energía cinética del fluido con la velocidad de disipación para el caso de $k-\varepsilon$ y la energía cinética del fluido con la disipación específica para $k-\omega$.

Seleccionando el modelo adecuado y especificando correctamente las condiciones de contorno se debe tener en cuenta otros factores como la simetría y la ortogonalidad, para garantizar una calidad de malla lo más alta posible y una solución confiable.

Para esto ICEM de Ansys, recomienda tener en cuenta los siguientes rangos en los valores de simetría y ortogonalidad.

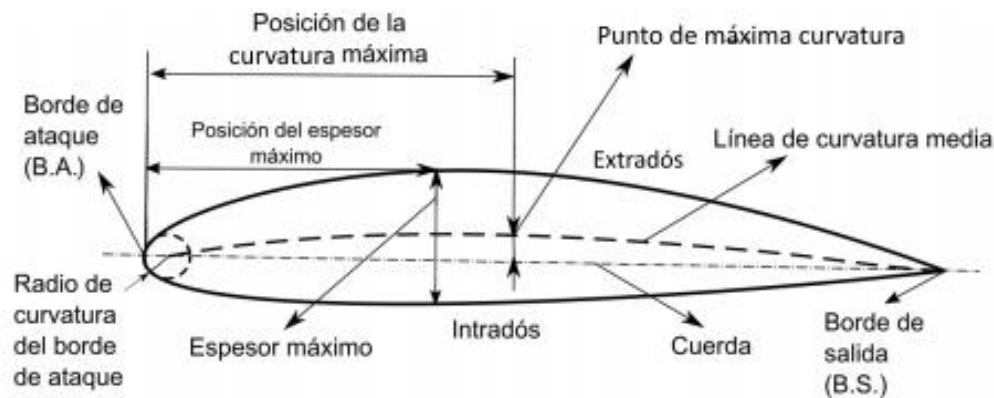
Tabla 1. Rango de valores de simetría y ortogonalidad recomendados para ICEM de Ansys.

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

(ANSYS Inc., 2020)

4.1.4 Perfil aerodinámico.

Teniendo en cuenta la nomenclatura establecida por NACA (The National Advisory Committee for Aeronautics), los cuales a través de estudios y pruebas en túneles de viento adoptaron una nomenclatura ordenada y detallada para validar completamente un perfil alar acorde a las necesidades del usuario. Esta nomenclatura se ve establecida según las partes del perfil así:

Figura 18. Nomenclatura de un perfil alar.

(Robles corpa, 2015)

Extradós: parte superior del perfil.

Intradós: parte inferior del perfil.

Borde de ataque: punto más adelantado de la sección (B.A).

Borde de salida: punto más retrasado de la sección (B.S).

Cuerda: línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida

Línea de curvatura media o línea media: línea formada por los puntos equidistantes entre extradós e intradós.

Radio del borde de ataque: define la forma del borde de ataque como un círculo tangente al extradós e intradós, y cuyo centro se sitúa en la línea tangente en el origen a la línea de curvatura media.

Punto de máximo espesor: es el punto sobre la cuerda, cuya distancia entre extradós e intradós medida de forma perpendicular a la cuerda, sea máxima.

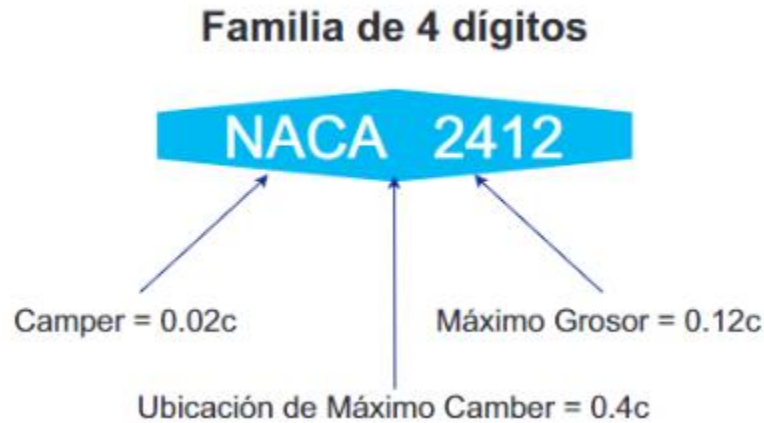
Curvatura máxima: es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil media.

Ángulo de ataque: es el que forma la dirección de la corriente incidente respecto a la cuerda del perfil.

4.1.4.1 Series NACA.

NACA empezó a emplear técnicas a través de métodos de ecuaciones analíticas para describir la línea de curvatura con el espesor a lo largo de la sección, de allí nacieron las primeras series de 4 y 5 dígitos. A medida que se realizaban pruebas, se fueron clasificando en series de 7 y 8 dígitos, los cuales se buscaba fomentar el flujo laminar sobre la superficie minimizando el coeficiente de resistencia. (Robles corpa, 2015).

Para familiarizarnos en cómo se define utilizaremos como ejemplo el perfil alar NACA2412.

Figura 19. *Ejemplo perfil NACA*

(Pinzón Paz, 2013)

Cada uno de los valores se toma a partir de la longitud de cuerda, así pues el primer dígito establece un porcentaje de camber máximo de 2% la longitud de cuerda, el siguiente número hace referencia a la posición del camber máximo que es al 40% la longitud de cuerda y los últimos dos dígitos hacen referencia al máximo espesor que sería de 12% la longitud de cuerda, por defecto este espesor máximo se ubica en la posición de 30% longitud de cuerda.

5. METODOLOGÍA

5.1 SELECCIÓN MODELO DE TURBINA.

En este apartado se realizó el estudio de diferentes modelos de turbinas implementadas en tecnología OWC para seleccionar un diseño eficiente, simple y viable que pueda suplir los objetivos del proyecto.

Figura 20. Diagrama de flujo para el modelo de turbina

Después de una amplia lectura y búsqueda de información, algunos de los artículos, libros y tesis más relevantes fueron (Daly et al., 2002),(Taha et al., 2010),(Torresi et al., 2008),(Torresi et al., 2009),(Ibarra Berastegi et al., 2018),(Santa et al., 2002),(Falcão & Gato, 2012)(Ghisu et al., 2018),(Curran & Gato, 1997),(Okuhara et al., 2013),(Schallenberg et al., 2008),(Vega, 2011),(HENAO, 2008),(Gutierrez, 2016),(Manuel García Díaz, 2016),(Ghisu et al., 2018),(Hurtado & Mejía, 2006),(Pereiras, 2008), (Das et al., 2017).

Tabla 2. Tabla comparativa de los modelos de turbinas encontrados en la literatura.

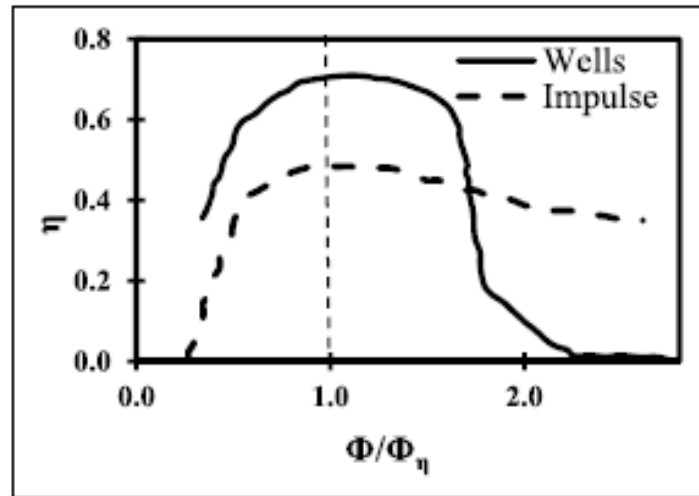
AUTOR	ARTÍCULO	TURBINA IMPLEMENTADA	TIPO DE MODELO	CONCLUSIÓN
-------	----------	----------------------	----------------	------------

Manabu Takao. Toshiaki Setoguchi.	Air Turbines for Wave Energy Conversion.	Turbina Wells. Turbina de impulso	Modelo numérico	Las turbinas de impulso poseen el potencial de ser superiores a las turbinas Wells en el desempeño general bajo condiciones de flujo irregular.
Tapas Kumar. Paresh Halder. Abdus Samad.	Optimal design of air turbines for oscillating water column wave energy systems: A review	Turbina Wells. Turbina de impulso	Modelo numérico	Turbinas Wells: Mayor eficiencia pico, rango de operación estrecho. Turbina de impulso: rango de operación amplio, menor eficiencia pico
Alfredo Santa. Alvaro Pinilla.	Generación de Energía Eléctrica a través de una Turbina Wells para dispositivos portátiles.	Turbina Wells	Modelo físico	Eficiencia del modelo físico cerca al 57% valores muy cercanos a los obtenidos teóricamente.
Pablo Patricio Valdez Loiacono	Estudio del flujo en un grupo turbinado de dos turbinas axiales unidireccionales para centrales OWC.	Turbina de impulso Axial	Modelo numérico	Las turbinas de impulso tienen un rendimiento máximo menor que la turbina Wells, pero sus curvas de rendimiento son más planas.

Antonio Falcao. L.M.C. Gato	Air turbines	Turbinas de impulso y turbinas Wells con álabes directrices	Modelo físico y numérico	Las turbinas de aire autorectificantes especialmente las de geometría constante, se encuentran entre los tipos de toma de fuerza más simples y confiables.
M. Torresi. M. Camporeale. Strippoli. Pascazio	Acurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine	Turbina Wells	Modelo Numérico	Es importante la optimización de la separación entre la punta del álabe y el ducto para mejorar el rendimiento de la turbina en términos de coeficiente de par y eficiencia.

De los anteriores archivos se logra resaltar tres de ellos que proporcionan información suficiente y detallada ya que resaltan el tipo de turbina a utilizar según los requerimientos y diseño con las especificaciones necesarias para el desarrollo del modelo y su validación

- Optimal design of air turbines for oscillating water column wave energy systems: A review (Das et al., 2017). Las turbinas de reacción como las de tipo Wells son fáciles de instalar, tienen un rango de operación estrecho y posee mayor eficiencia pico. Por el contrario, las turbinas de impulso como las de tipo axial, radial y de flujo cruzado tienen un rango operativo más amplio (operación en coeficientes de flujos elevados). Y una eficiencia pico menor a las de reacción, ver imagen 20.

Figura 21. Comparación eficiencia coeficiente de flujo para turbinas Wells y de impulso.

(Das et al., 2017)

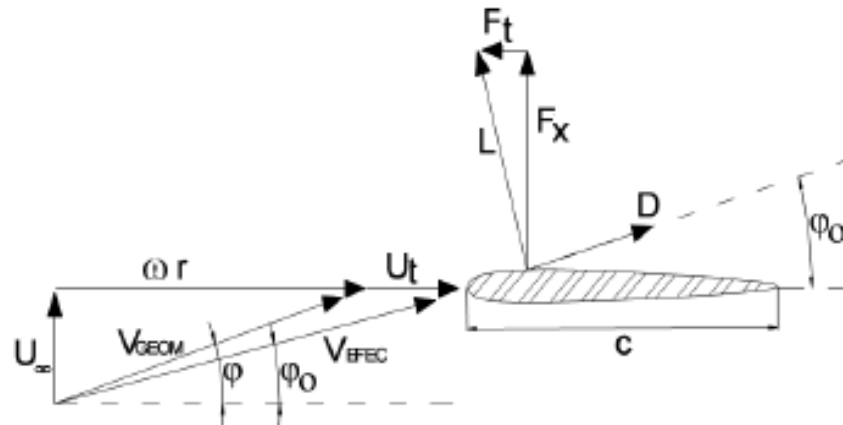
- Air turbines. (Falcão & Gato, 2012). Las turbinas de aire autorectificantes (rotación independiente de la rotación de flujo), especialmente las de geometría constante, se encuentran entre los tipos de toma de fuerza más simples y confiables. Se han propuesto, estudiado y en algunos casos construido varios tipos de turbinas de aire autorectificantes para equipar prototipos OWC, casi todas son máquinas de flujo axial, donde el concepto de turbina Wells ha sido el más elegido para prototipos. Según (Falcão & Gato, 2012)

Las turbinas de aire capaces de operar con alta eficiencia en una amplia gama de condiciones de flujo aleatorias, incluida la inversión de dirección, posiblemente requiera geometría y control variables. Esto puede disuadir o retrasar su aplicación en un campo tecnológico en el que el mantenimiento es difícil y costoso, y la confiabilidad es esencial.

A partir de lo expuesto anteriormente se implementará para el desarrollo del proyecto las turbinas de reacción, más específicamente las de tipo Wells, ya que son de fácil construcción debido a su diseño, además de poseer una mayor eficiencia que nos facilitará el estudio de ésta en la

simulación, y gracias a la simetría de sus álabes cumple con la característica fundamental de mantener un mismo sentido de giro sin importar la dirección del flujo.

Figura 22. Velocidades y fuerzas sobre perfil aerodinámico de una turbina Wells



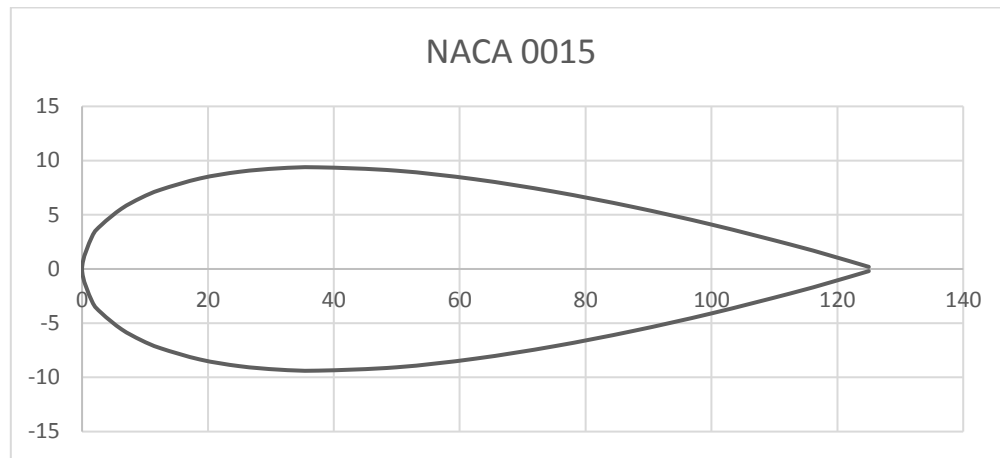
(HENAO, 2008)

Estableciendo el tipo de turbina a implementar, se busca en la literatura un modelo de turbina utilizado en la tecnología OWC, con el fin de realizar y validar la simulación.

- Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine. (Torresi et al., 2008) Este artículo menciona el tipo de perfil y la geometría utilizada para establecer las características de la turbina que se implementará.

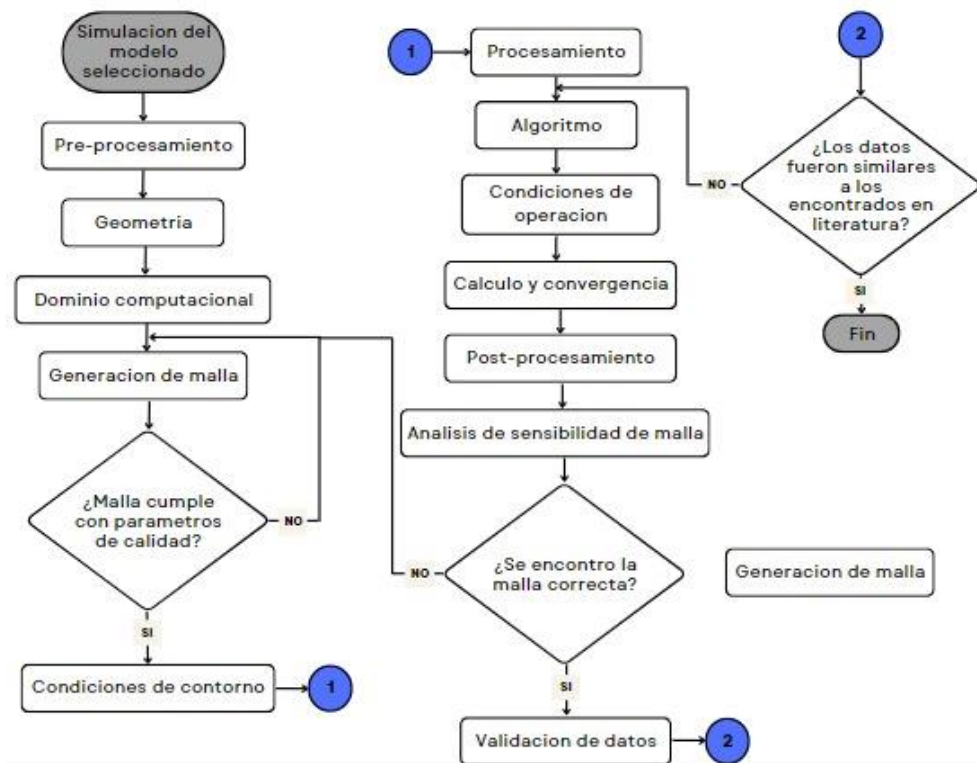
La geometría de los álabes según NACA son clasificados por serie de cuatro dígitos, debido a esto los álabes no tienen camber, cuentan con solo espesor, luego los dos primeros dígitos se establecen con ceros. Para el modelo se seleccionó un perfil NACA 0015.

Figura 23. Perfil NACA 0015.



5.2 SIMULACIÓN DE MODELO SELECCIONADO.

Figura 24. Diagrama de flujo de validación del modelo seleccionado



5.2.1 Pre-procesamiento

5.2.1.1 Geometría.

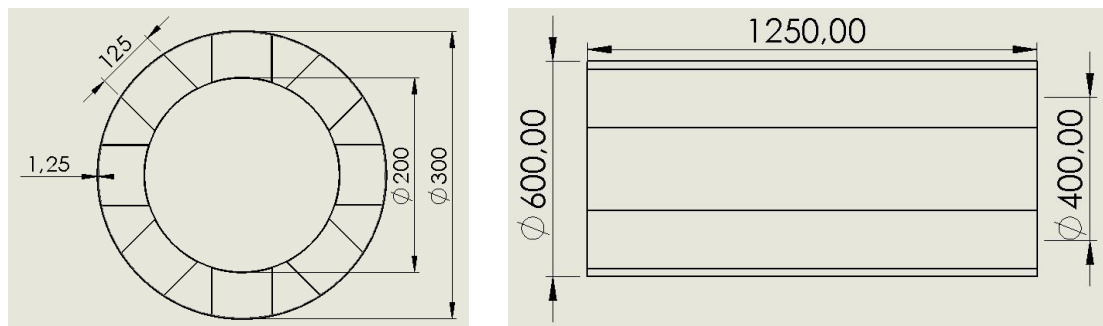
Los parámetros de la turbina utilizados en el modelo numérico se muestran en la tabla 3 a continuación. La geometría y dimensiones del nuevo diseño de la turbina Wells se muestra en la figura 25.

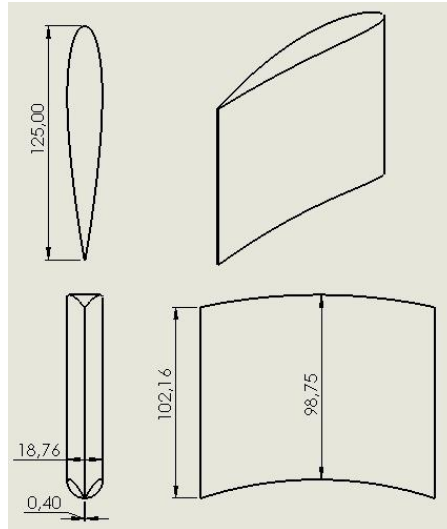
Tabla 3. Especificaciones de la turbina a validar.

Perfil	NACA 0015
Número de álabes	8
Longitud de cuerda	125 mm
Radio del ducto	300 mm
Radio del cubo	200 mm
Radio medio	250 mm
Relación de cubo a punta	0.6667
Solidez	0.64
Distancia entre la punta del perfil y el ducto	1.25 mm
Velocidad rotacional	2000 rpm

(Torresi et al., 2008)

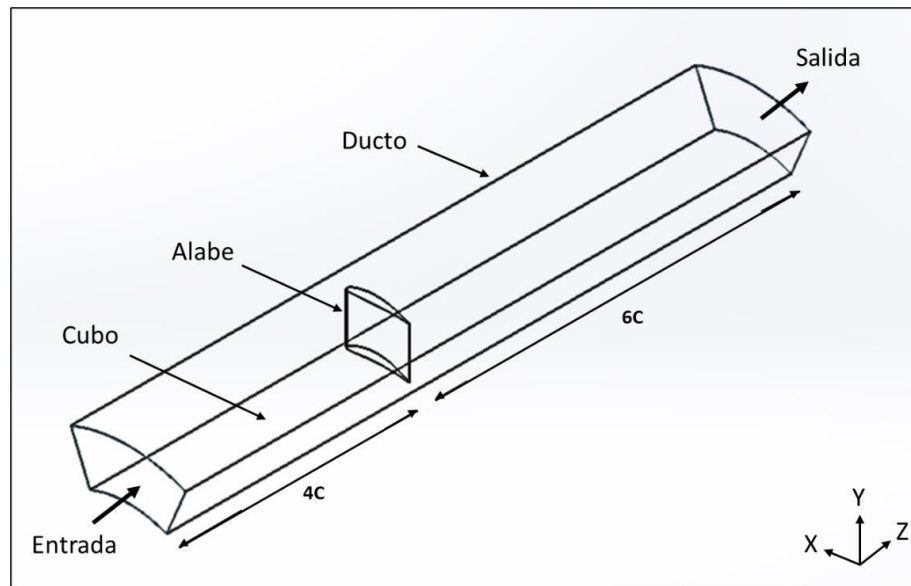
Figura 25. Plano de diseño de la turbina Wells (unidades en mm).





5.2.1.2 Dominio computacional

Con el fin de ahorrar recursos computacionales y dado que la turbina cuenta con simetría radial, para el dominio de la turbina solo se ha modelado una octava parte de ella y la longitud se ha limitado en la dirección axial a cuatro veces la longitud de la cuerda hacia la entrada y seis veces la longitud de la cuerda hacia la salida del alabe,(Torresi et al., 2009), además, se establece una mejor resolución en la malla.

Figura 26. *Dominio computacional*

(Torresi et al., 2008)

5.2.1.3 Generación de malla

La definir la malla adecuadamente es necesaria para poder realizar la simulación, además, debe cumplir con unas series de condiciones con el fin de que los resultados obtenidos luego de la simulación representen la realidad. Algunas de las más importantes según (Patricio, 2013) son:

Las fronteras del dominio deben acomodarse de modo que las condiciones de contorno queden bien definidas.

Distribución regular y escalonada gradualmente cuando el tamaño varíe en zonas donde se desee más precisión, sin variaciones en la densidad de celdas.

Realizar una malla de mayor densidad para las zonas donde se espere un mayor cambio espacial.

Los modelos de pared estiman el comportamiento del flujo en la pared adyacente, por lo cual el tamaño de la celda adyacente a los contornos sólidos del álabe es importante.

El dominio para mallar corresponde al mostrado anteriormente (Figura 26), para facilitar los cálculos se realizó una malla estructurada tipo H en la cual se obtiene buenos resultados y por lo general menos error, con un refinamiento en la zona cercana del álabe para una mejor resolución, el software utilizado para la elaboración de la malla ha sido ICEM CFD 2020 R1.

Figura 27. *Malla estructurada tipo H*

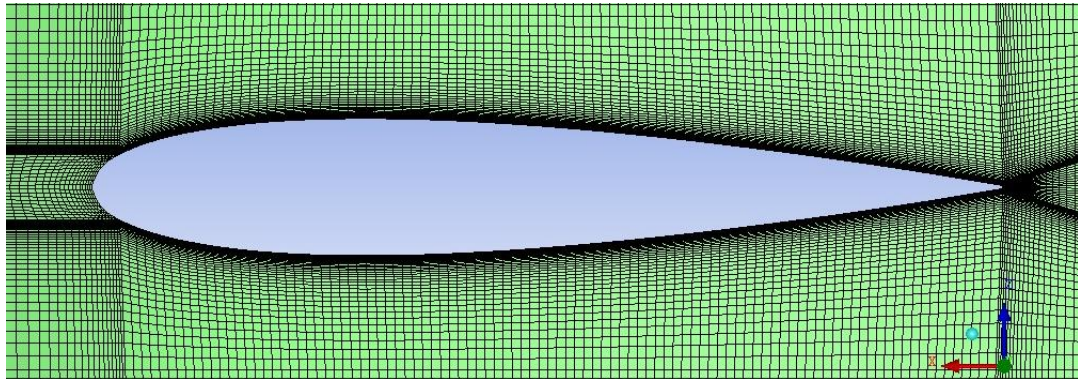
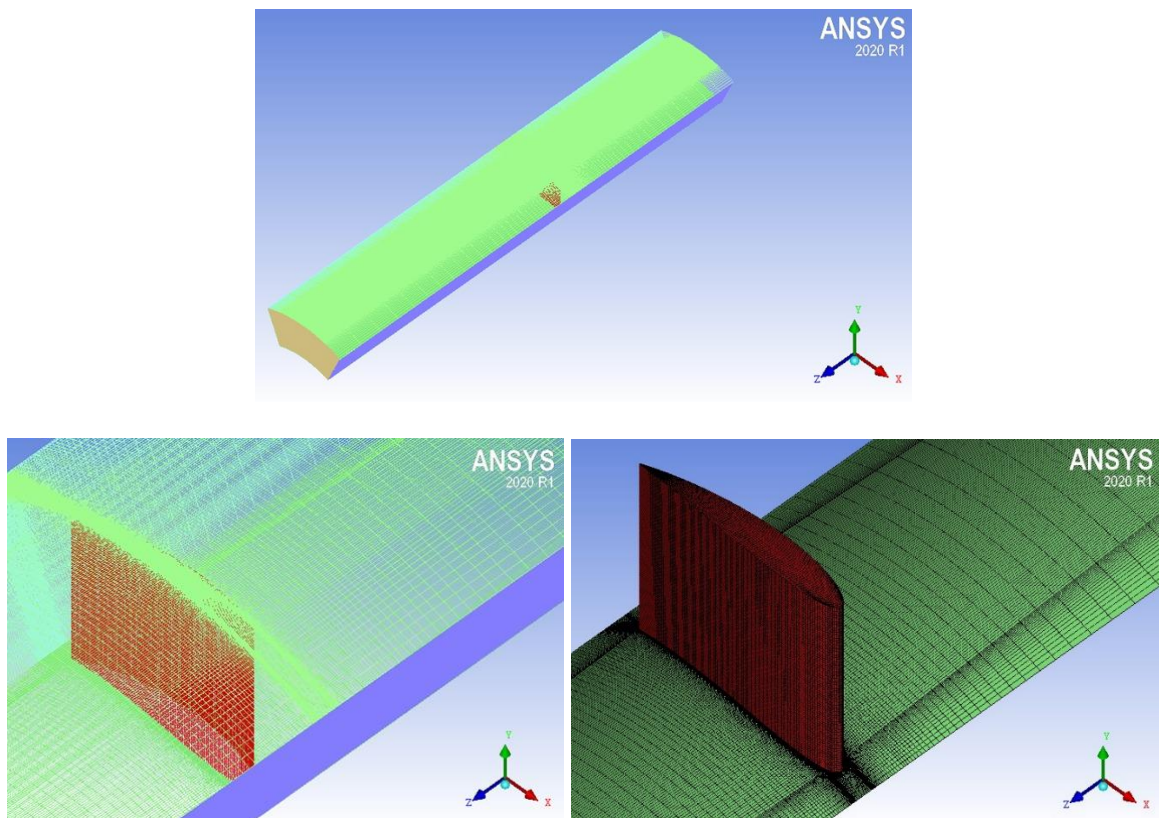


Figura 28. *Malla del perfil y ducto del dominio computacional.*



5.2.1.4 Tamaño y calidad

En este caso, se crearon tres mallas como se muestra a continuación:

Tabla 4. *Tamaño de la malla representada en nodos y elementos.*

	N° de nodos	N° de elementos
Malla 1	794.780	829.326
Malla 2	1.331.860	1.377.788
Malla 3	1.739.100	1.797.526

La calidad de la malla es un factor clave para la resolución del problema y puede afectar a los datos obtenidos como a la convergencia y estabilidad del cálculo. Por lo tanto, la calidad de la malla debe ser lo más alta posible.

Para medir la calidad del mallado se utilizan los parámetros de oblicuidad y calidad ortogonal, según los valores máximos y mínimos obtenidos.

Tabla 5. *Parámetros de oblicuidad y ortogonalidad para las distintas mallas.*

	Oblicuidad	
	Mínimo	Máximo
Malla 1	0.1001	1
Malla 2	0.10015	1
Malla 3	0.074	1
	Calidad ortogonal	
	Mínimo	Máximo
Malla 1	0.043	1

Malla 2	0.016	1
Malla 3	0.037	1

Sabiendo que los valores máximos de la calidad ortogonal y de la oblicuidad son 1, es necesario determinar la cantidad de elementos que componen dicho valor, así pues se presentan las siguientes gráficas para la malla 2.

Figura 29. *Calidad de la oblicuidad.*

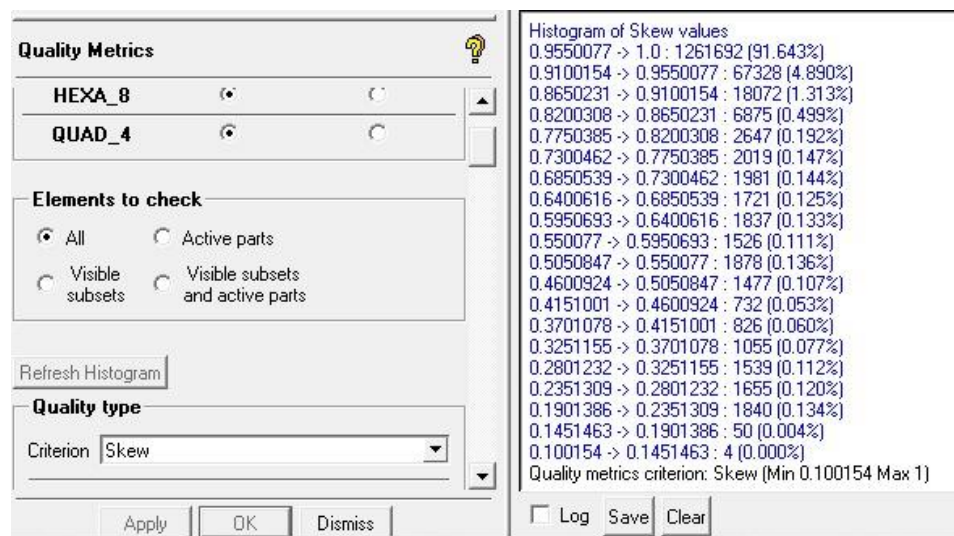
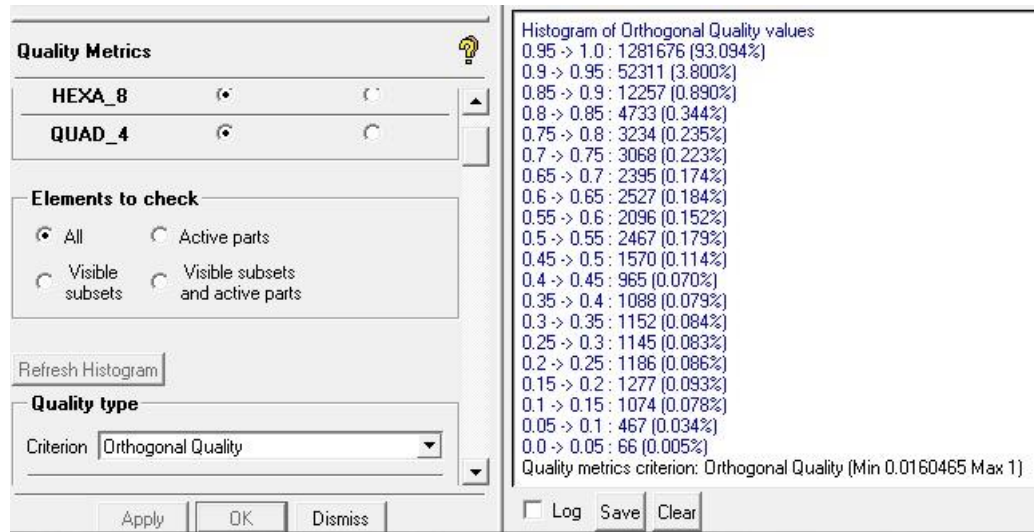


Figura 30. Calidad ortogonal.



Las gráficas anteriores muestran como más del 95% de los elementos de la malla superan los valores de 0.95 – 1, verificando así que la malla tiene una calidad excelente según lo establecido en (ANSYS Inc., 2020).

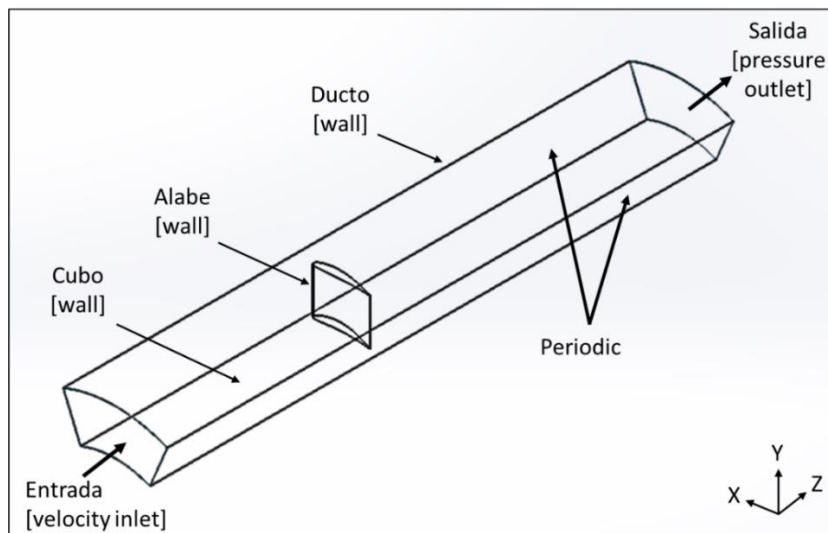
Se realizó el mismo procedimiento en la malla 1 y en la malla 3 para determinar la calidad en los valores de oblicuidad y ortogonalidad, obteniendo datos similares.

5.2.1.5 Condiciones de contorno

En realidad, las turbinas funcionan de forma no estacionaria porque las condiciones de operación dependen de las olas. Sin embargo, asumiendo que no se produzcan cambios significativos en el flujo o en las condiciones de contorno durante el tiempo de residencia de las partículas en la turbina, se puede asumir una operación en estado cuasi-estacionario. (Raghunathan, 1995)

Así, asumiendo la hipótesis cuasi-estacionaria, el modelo numérico representa la turbina en estado estacionario con condiciones constantes de entrada y salida. Las principales condiciones de contorno del modelo se describen a continuación.

Figura 31. *Condiciones de contorno del dominio computacional*



(Torresi et al., 2008)

Periodicidad: como se mencionó anteriormente, solo se simulará 1/8 de la turbina ya que cuenta con simetría radial, por lo que el dominio en sus aristas laterales presenta superficies periódicas, debido a esto se le asigna la condición de periodic.

Entrada: se ha definido como velocity inlet, para analizar un rango de trabajo se han tomado cinco valores de coeficiente de caudal (U^*), que se relacionan a diferentes velocidades axiales.

Tabla 6. *Velocidades de entrada, para cada coeficiente de caudal.*

Coeficiente de flujo [U*]	Velocidad axial de entrada [m/s]
0.075	4.712
0.125	7.854
0.175	10.996
0.225	14.137
0.275	17.279

(Kumar et al., 2019)

Salida: se asigna como pressure outlet, el salto de presión se mide con la atmósfera, por lo que se toma la presión manométrica de salida como cero.

Pared: se define como wall, esta se aplica a las superficies solidas de la turbina (ducto, cubo y alabe) y se aplica la condición de no deslizamiento.

5.2.2 Procesamiento

5.2.2.1 Algoritmo

Para el desarrollo de las simulaciones de este trabajo se ha utilizado el software Ansys CFX 2020 R1, programa de alto rendimiento y de uso comercial aplicado para resolver problemas de fluidos, ampliamente usado en la industria y en investigación.

El software CFD resuelve problemas de mecánica de fluidos a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes: continuidad, cantidad de movimiento y energía. El método más utilizado en mecánica de fluidos es el método de volumen finito, que aprovecha la naturaleza conservadora de las ecuaciones, y consiste en discretizar el dominio en pequeños volúmenes llamados celdas para aplicar cantidad de movimiento, energía y balance de masa en cada uno de estos. (Patricio, 2013)

5.2.2.2 Modelo de turbulencia y pared

La turbulencia consiste en fluctuaciones temporales y espaciales en el campo de flujo. Este es un proceso complejo, principalmente porque es inestable en tres dimensiones y tiene muchas escalas. Esto es importante en las turbinas porque sus condiciones de operación hacen que el flujo sea turbulento.

Para predecir los efectos de la turbulencia, muchos estudios de CFD se han centrado en cómo utilizar los modelos de turbulencia. Los modelos de turbulencia están diseñados específicamente para tener en cuenta los efectos de la turbulencia sin recurrir a mallas muy finas o simulaciones numéricas directas.(Ansys, 2020).

Para el presente trabajo se ha seleccionado k-omega, Shear Stress Transport (SST), basado en Eddy viscosity de dos ecuaciones como modelo de turbulencia, ya que es adecuado para flujos que implican separación y gradiente de presión adversa.

Sin embargo, las turbinas crean un fenómeno de interacción entre el flujo y las paredes fijas. Esta interacción tiene lugar en forma de fenómenos de capa límite, donde domina el flujo de transporte entre flujo laminar y turbulento. Es necesario un modelado preciso de la turbulencia cerca de las paredes para lograr resultados realistas; Por lo tanto, el modelo elegido es una combinación del modelo k-ε y el modelo k-ω, aplicando el modelo k-ω a la región de la pared cercana y el modelo k-ε a la región de la pared lejana, logrando así compensar ambos límites.

A continuación se pueden observar las ecuaciones que rigen el modelo SST y cómo cambia su comportamiento a medida que se aleja de la capa límite. (Martínez, 2019).

Ecuación de transporte para la Energía Cinética Turbulenta (k-ω):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j * \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} * \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} * \left((\nu + \sigma k \nu_t) \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right)$$

Ecuación de transporte para la Frecuencia Turbulenta (k - ϵ):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma_\omega v_t) \left(\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right) + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \omega_2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

Figura 32. Gráfica de variación para las ecuaciones k - ω y k - ϵ en el dominio.



(Martínez, 2019)

5.2.2.3 Condiciones de operación

Los parámetros de operación se indican en la siguiente tabla:

Tabla 7. Parámetros de operación.

Fluido de trabajo	Aire
Presión de referencia [Pa]	101325
Densidad [Kg/m^3]	1.225
Viscosidad [$\text{Kg}/\text{m}^*\text{s}$]	$1.7894 \cdot 10^{-5}$

Tomado de (Kumar et al., 2019).

5.2.2.4 Cálculo y convergencia

Figura 33. Especificaciones CPU y tarjeta gráfica ordenador Acer propio

Especificaciones de la CPU	
Cantidad de núcleos ?	2
Cantidad de subprocesos ?	4
Frecuencia básica del procesador ?	2,70 GHz
Frecuencia turbo máxima ?	3,50 GHz
Caché ?	4 MB Intel® Smart Cache
Velocidad del bus ?	4 GT/s
Frecuencia de la Tecnología Intel® Turbo Boost 2.0* ?	3.50 GHz

Fabricante del controlador de gráficos	NVIDIA®
Modelo de controlador de gráficos	GeForce® 940MX
Capacidad de memoria gráfica	Hasta 2 GB

El ordenador con el que se realizaron la mayoría de las simulaciones es una Acer Aspire F15 que consta de 2 núcleos físicos, 4 núcleos simulados para un total de 6 Core y consta de una tarjeta gráfica NVIDIA GeoForce 940 MX de 2 Gb.

Las simulaciones se ejecutaron con doble precisión para minimizar el error de redondeo. Para garantizar la convergencia, la raíz cuadrática media (RMS) de los residuos y el desequilibrio de masa se establecieron en $10e-5$ y 0.001%, respectivamente.

5.2.3 Post-procesamiento

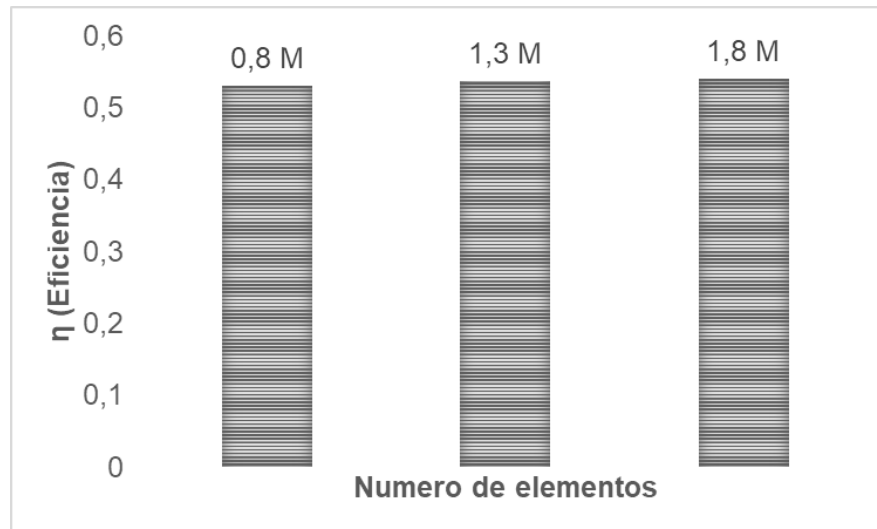
5.2.3.1 Análisis de sensibilidad de la malla

La resolución numérica adecuada del flujo tiene aspectos que afectan en gran medida los resultados y el tiempo de cálculo.

Los estudios de sensibilidad permiten identificar el efecto del tamaño de la malla en los resultados del modelo numérico. En este modelo, usamos las tres mallas mencionadas anteriormente para investigar la dependencia de los resultados en el tamaño de la malla. Considerando el modelo de

turbulencia anterior, las condiciones de frontera y de convergencia, se analiza el efecto sobre la eficiencia de la turbina con un coeficiente de flujo de $U^*=0.225$.

Figura 34. Independencia de malla para un coeficiente de flujo $U^*=0.225$



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los diferentes tamaños de malla reflejados en la figura anterior, se observa una variación mínima en la eficiencia, por lo que se elige utilizar la malla de 1'377.788 elementos que evita un coste computacional, además de suplir la necesidad del modelo de pared para valores exactos de torque y arroja resultados de calidad.

5.2.3.2 Validación del modelo

Para la validación del modelo se han realizado cinco simulaciones con diferentes coeficientes de flujo, con el fin de comparar los resultados con datos existentes en la literatura, así pues se utilizan las ecuaciones correspondientes de cada valor de coeficiente (Kumar et al., 2019).

- **Coficiente de torque (T^*)**

$$T^* = \frac{T}{\rho * \omega^2 * R_{Tip}^5}$$

- **Coficiente de presión (ΔP^*)**

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\rho * \omega^2 * R_{tip}^2}$$

- **Eficiencia (η)**

$$\eta = \frac{T * \omega}{Q * \Delta P}$$

- **Coefficiente de flujo (U^*)**

$$U^* = \frac{U_A}{U_{tip}}$$

Figura 35. *Coefficiente de torque*

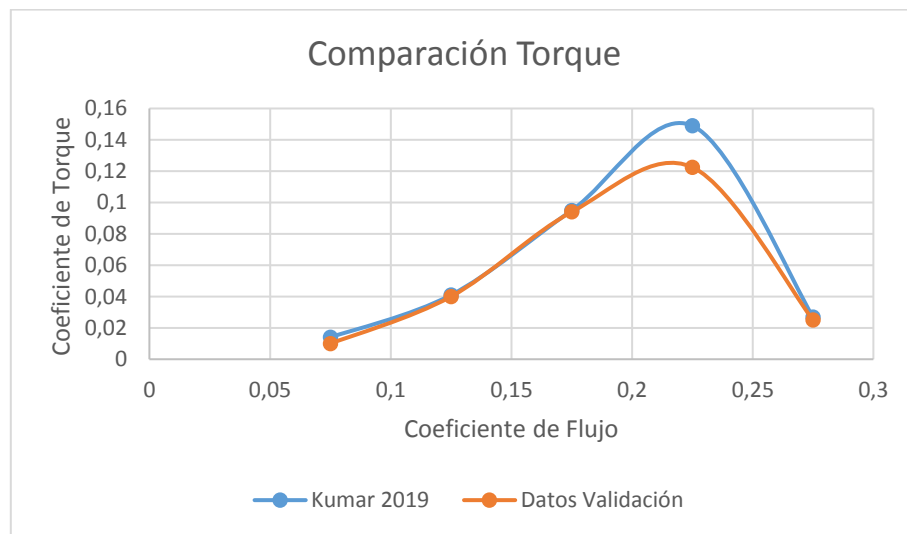
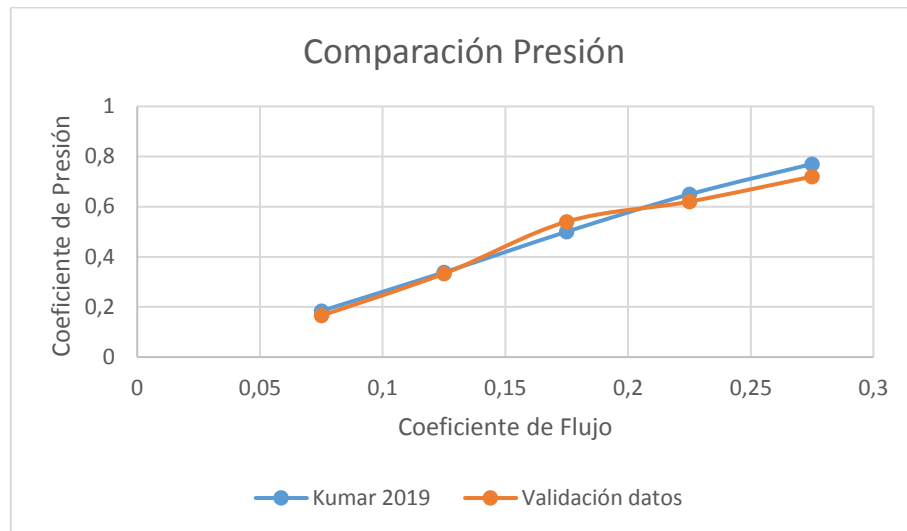
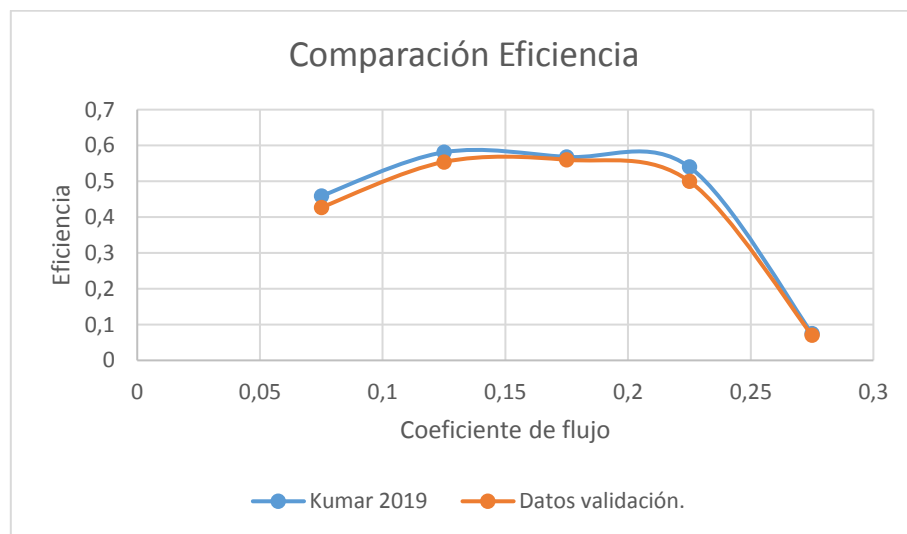


Figura 36. *Coefficiente de presión.***Figura 37.** *Eficiencia.*

En las figuras 35, 36 y 37 se muestran los resultados existentes en comparación con los resultados actuales del presente trabajo para los parámetros adimensionales T^* , P^* , η en función del coeficiente de flujo.

Tabla 8. *Tabla comparativa de los valores de eficiencia, coeficiente de presión y torque.*

Coeficiente Flujo	Eficiencia		Coeficiente De Presión		Coeficiente de Torque	
	Kumar 2019	Datos de Validación	Kumar 2019	Datos de Validación	Kumar 2019	Datos de Validación
0,07	0,45	0,42	0,18	0,18	0,18	0,18
0,12	0,58	0,55	0,32	0,32	0,32	0,32
0,17	0,58	0,55	0,48	0,52	0,48	0,52
0,22	0,52	0,48	0,62	0,60	0,62	0,60
0,27	0,08	0,08	0,75	0,70	0,75	0,70

0,075	0,459	0,427	0,184	0,1654	0,014	0,01
0,125	0,581	0,554	0,338	0,3328	0,041	0,04
0,175	0,568	0,56	0,5	0,54	0,095	0,094
0,225	0,54	0,5	0,649	0,62	0,149	0,1225
0,275	0,075	0,07	0,77	0,72	0,027	0,025
Promedio	0,4446	0,4222	0,4882	0,47564	0,0652	0,0583
% Error Relativo	5,038236617		2,5727161		10,58282209	

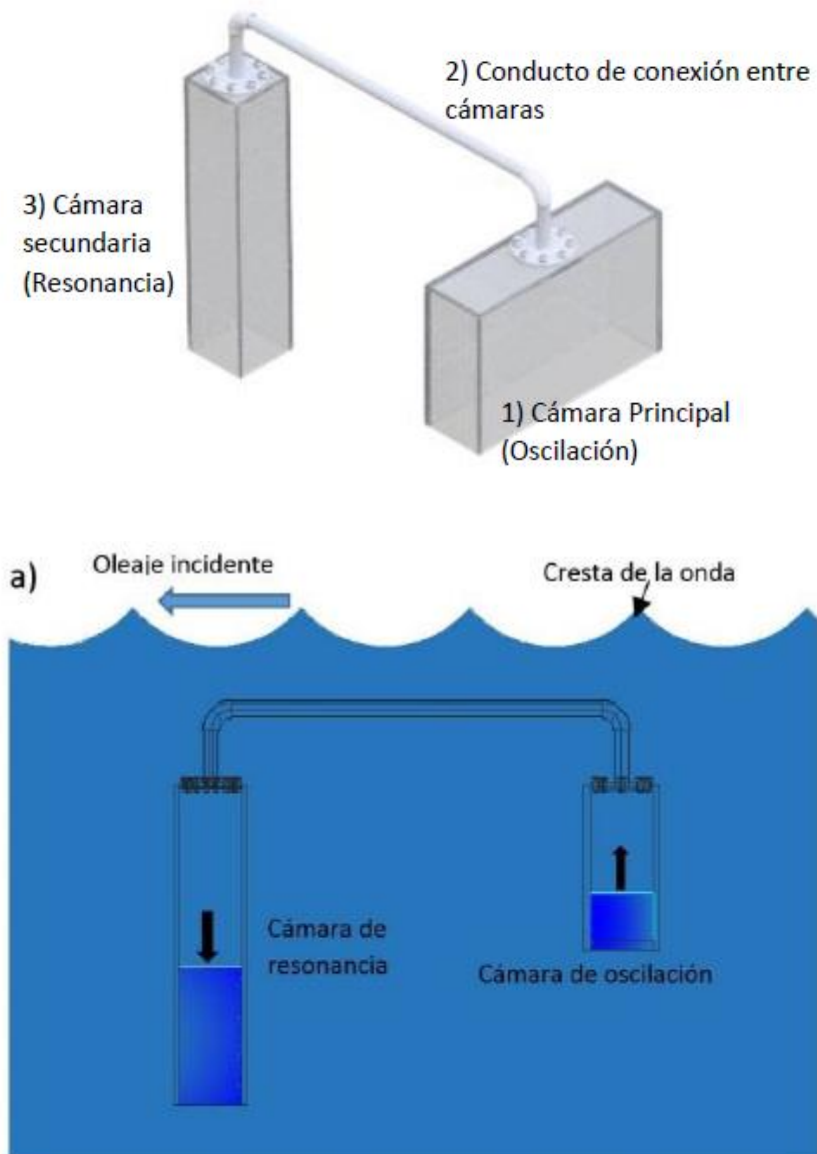
Los resultados obtenidos muestran que el modelo simula correctamente el comportamiento de la turbina, donde se puede observar que las tendencias son muy similares y la diferencia de los valores numéricos es mínima; la caída de presión es muy precisa, los valores del coeficiente de torque y rendimiento en la turbina presentaron una caída repentina (condiciones de pérdida) alrededor de $U^* = 0.225$, esto ocurre cuando la turbina alcanza altas velocidades debido a que el perfil trabaja con un alto ángulo de ataque lo que causa pérdidas.

5.3 PROPÓSITO DEL MODELO

Teniendo en cuenta que el principio de operación del dispositivo OWC es generar un flujo de aire mediante la oscilación de una columna de agua, el dispositivo OWC-MDS es un prototipo en etapa experimental que aún está siendo objeto de estudio y optimización; este consiste en un sistema cerrado de dos cámaras conectadas por un ducto con aire en su interior y totalmente sumergido en el mar, sin embargo, este dispositivo cumple con el mismo principio de operación y el flujo de aire que fluye entre las cámaras pueda ser aprovechado por una turbina, debido a que su funcionamiento es diferente al convertidor convencional. El propósito final es diseñar una turbina para el

convertidor de energía undimotriz OWC-MDS, utilizando el mismo modelo anterior de simulación (pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento) revisando el desempeño y la posible extracción de energía que se pueda obtener para el convertidor OWC-MDS.

Figura 38. *Dispositivo OWC-MDS*



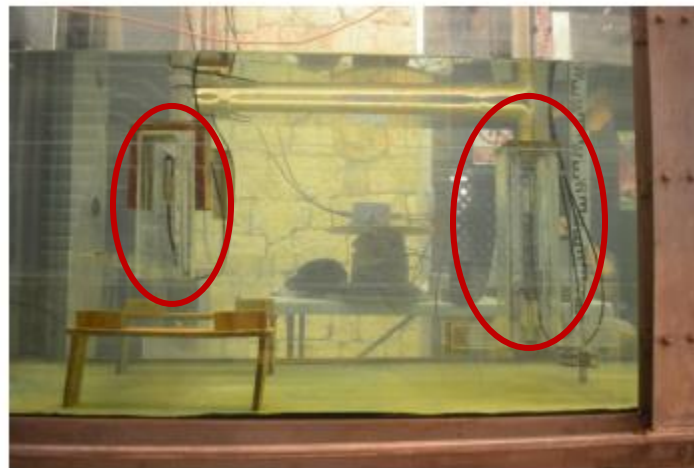
(Dominguez, 2018)

Debido a que el convertidor OWC convencional (modelo validado) es un dispositivo que actualmente se ubica en las costas (on-shore) se encuentra expuesto al ambiente, para este nuevo

modelo se tiene un dispositivo sumergido, el cual se puede ubicar (off-shore) o (near shore) donde se va a ver expuesto a otro tipo de ambiente y condiciones climáticas.

Algunas de las condiciones de operación que se tienen frente a la simulación CFD van a cambiar una respecto a la otra, en el caso para el convertidor OWC en el desarrollo de la simulación se toma como condición de salida una presión manométrica cero en el dominio computacional, esto debido a que el salto de presiones se mide con respecto a la atmosfera y para el convertidor OWC-MDS se tomará como condición de salida diferentes presiones, datos tomados por un sensor al interior de las cámaras que se verán reflejados más adelante.

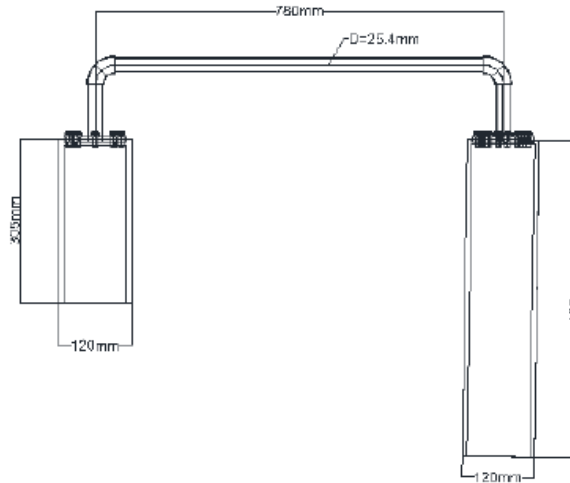
Figura 39. *Modelo físico del convertidor OWC-MDS con sensores de presión.*



(Dominguez, 2018)

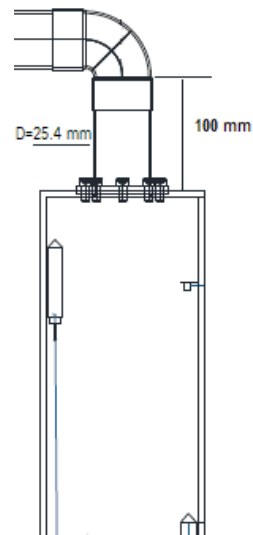
5.3.1 Diseño de la turbina

Para el diseño de la turbina se toman algunos datos proporcionados del modelo OWC-MDS.

Figura 40. Esquema del diseño propuesto del dispositivo MDS.

(Dominguez, 2018)

Teniendo en cuenta el diseño del ducto que conecta las dos cámaras, la medida del tubo que se tomará para la simulación es 100 mm de largo, 25.4 mm de diámetro a la entrada de la cámara de resonancia, pues es en éste sitio donde se ubicará la turbina.

Figura 41. Geometría del ducto para el diseño de la turbina

(Dominguez, 2018)

Se realiza un proceso de similitud geométrica basado en dos datos principales tomados del anterior modelo seleccionado como la solidez y la relación de diámetro (cubo a punta) tomando la metodología de diseño del autor [16].

Solidez (σ) = 0.64

Relación cubo a punta (h) = 0.6667

$$h = \frac{R_{cubo}}{R_{ducto}}$$

$$R_{cubo} = h * R_{ducto} = 0.6667 * 12.7$$

$$R_{cubo} = 8.467 \text{ mm}$$

Conservamos el mismo número de alabes con el fin de mantener el mismo torque de arranque [16].

Número de álabes (N) = 8

$$\sigma = \frac{N * C}{\pi * R_{exterior} * (1 + h)}$$

$$C = \frac{\sigma * \pi * R_{exterior} * (1 + h)}{N} = \frac{0.64 * \pi * 12.7 * (1 + 0.6667)}{8}$$

$$C = 5.32 \text{ mm}$$

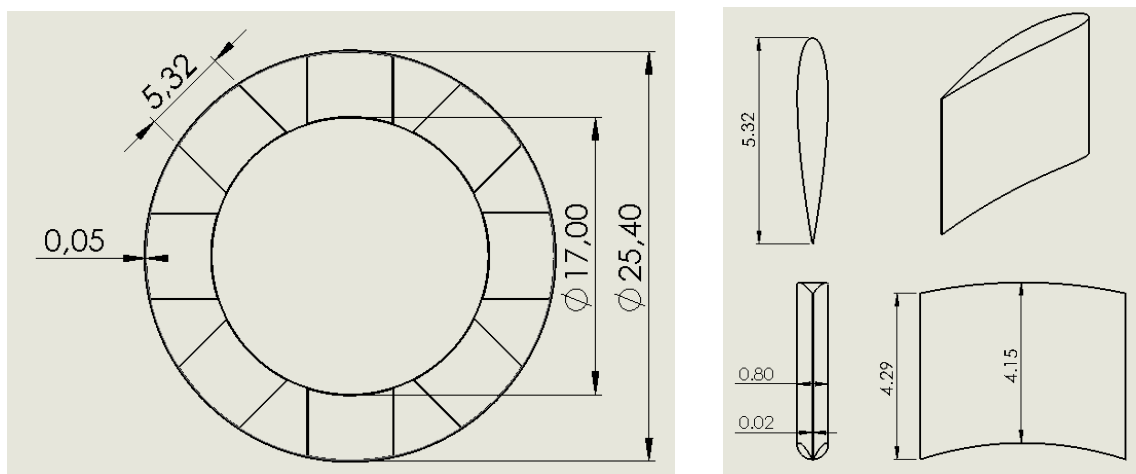
Para el perfil aerodinámico se mantiene el NACA 0015, además la distancia entre la punta del perfil y el ducto se toma como el 1% de C (cuerda) [17], a continuación, se muestran los parámetros geométricos de la turbina:

Tabla 9. Especificaciones de la nueva turbina Wells.

Perfil	NACA 0015
Número de álabes (N)	8
Longitud de cuerda (C)	5.32 mm

Radio del ducto	12.7 mm
Radio del cubo	8.5 mm
Radio medio	10.6 mm
Relación de cubo a punta (h)	0.6667
Solidez (σ)	0.64
Distancia entre la punta del perfil y el ducto – 1% de C	0.0532 mm
Velocidad rotacional	2000 rpm

Figura 42. Plano del nuevo diseño de la turbina Wells (unidades en mm)



5.3.2 Tamaño y calidad de malla del nuevo diseño.

Una vez realizado el diseño de la turbina, se define el tamaño de la malla, la cual cuenta con un total de elementos de 391.308 y 369.844 nodos. Luego se procede a determinar el tipo de malla y la calidad de la misma teniendo en cuenta los valores máximos para obtener resultados óptimos.

Figura 43. Malla del perfil y ducto del dominio computacional del nuevo diseño.

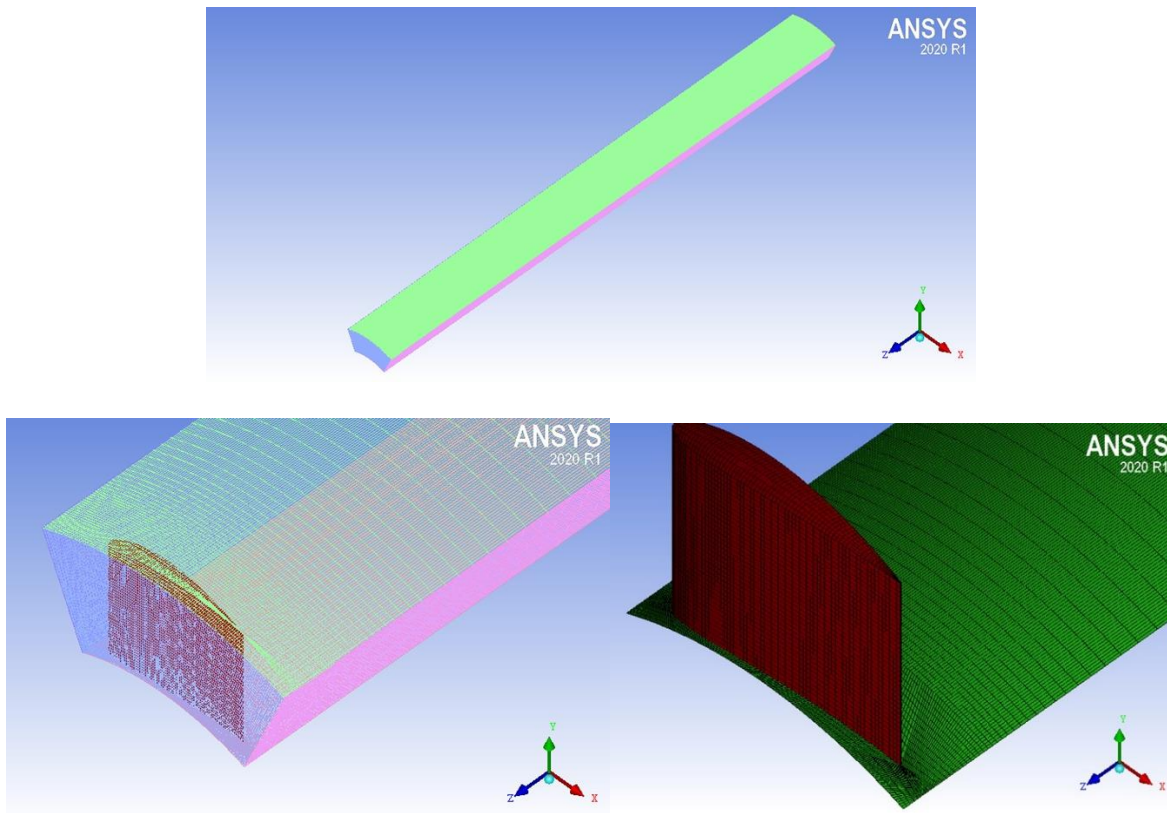


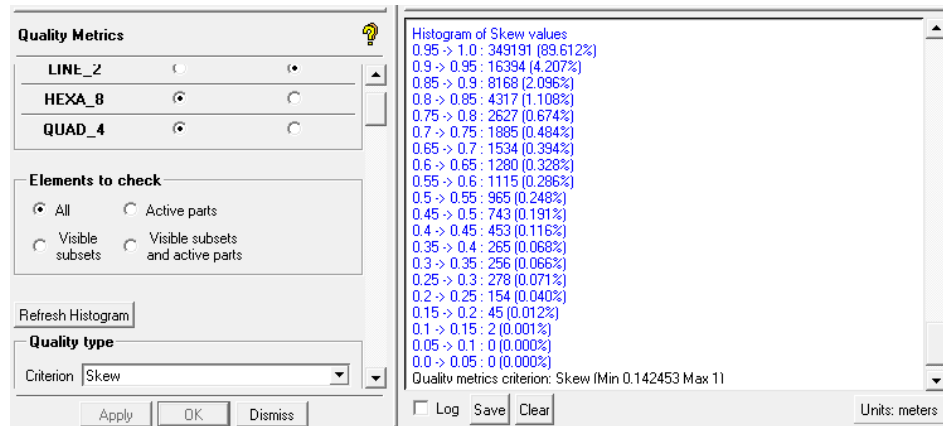
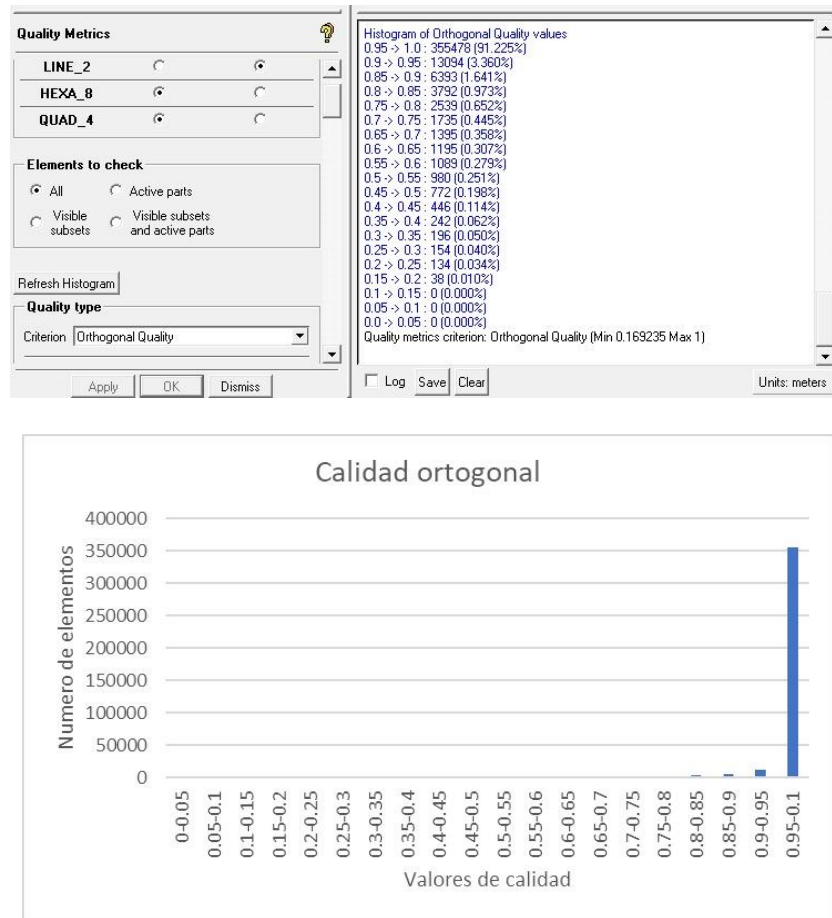
Figura 44. Calidad de la oblicuidad del nuevo diseño.

Figura 45. Calidad ortogonal del nuevo diseño.

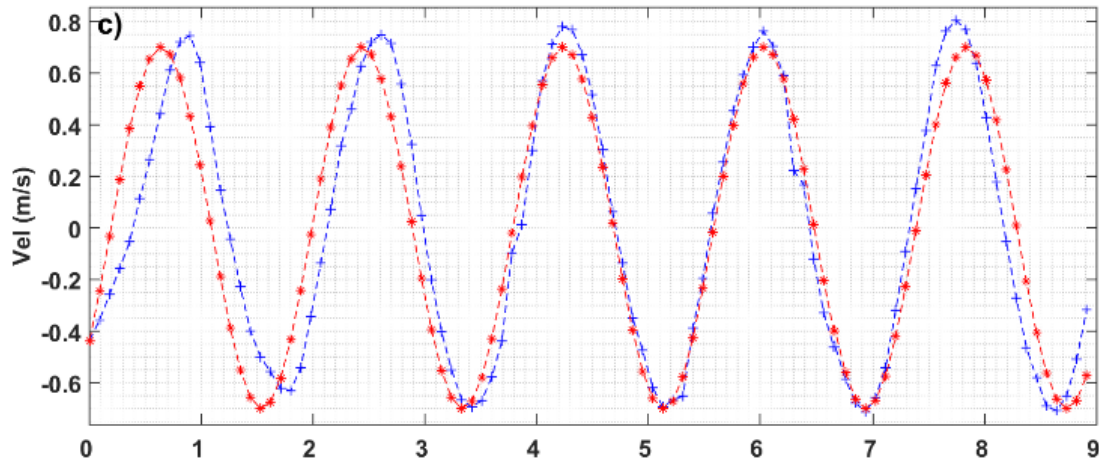
Teniendo en cuenta las gráficas mostradas anteriormente y las condiciones para establecer valores óptimos en la calidad de la malla se puede comprobar que estas cuentan con una calidad de oblicuidad y ortogonalidad adecuadas según lo establecido en (ANSYS Inc., 2020).

5.3.3 Condiciones de operación del nuevo diseño.

Según los resultados obtenidos en el laboratorio del convertidor OWC-MDS se demostró que para un oleaje de 20 cm y un periodo de 2s el dispositivo puede obtener la eficiencia máxima, la cual oscila entre 50 % y 70%. (Dominguez, 2018); Siendo esta configuración la que obtuvo los mejores resultados. Teniendo en cuenta lo anterior se toman estos valores de velocidad y presión como condiciones de operación para el desarrollo de la simulación con el fin de lograr obtener el mejor rendimiento de la turbina implementada.

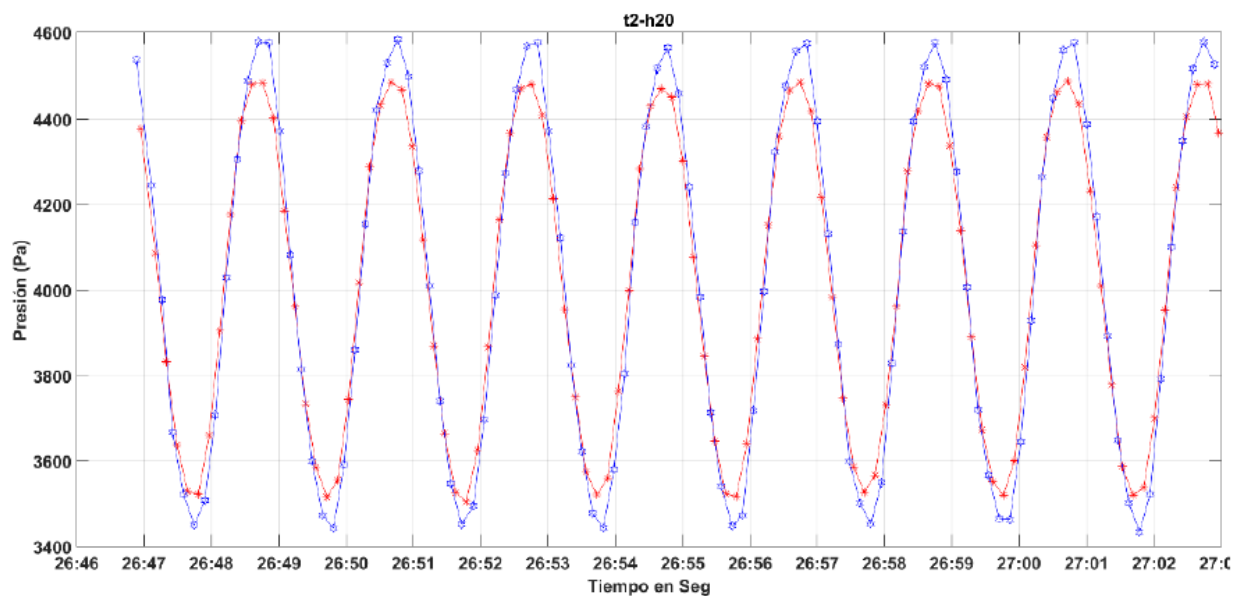
Se asumió un comportamiento lineal de presión y velocidad, ya que durante la mayor parte del ciclo se mantiene así según las siguientes gráficas.

Figura 46. Comportamiento de la velocidad en la cámara de resonancia del OWC-MDS



(Dominguez, 2018)

Figura 47. Comportamiento de la presión en la cámara de resonancia del OWC-MDS



(Dominguez, 2018)

En esta ocasión los parámetros de operación de la turbina en presión varían según su velocidad, debido a que la presión de salida ya no va a ser la atmosférica sino la presión de la cámara de oscilación la cual oscila entre los 3513 y los 4405 [Pa], a una velocidad que alcanza valores de 0 a 0.69 [m/s].

Teniendo en cuenta que los valores de velocidad registrados son de la cámara de resonancia y que la turbina Wells se va a ubicar en el ducto que conecta las dos cámaras, se debe determinar mediante las siguientes ecuaciones de conservación la velocidad que circula por el ducto y que atraviesa la turbina, teniendo en cuenta que es un flujo incompresible.

$$Q = V * A$$

$$Q1 = Q2$$

$$V1 * A1 = V2 * A2$$

$$V2 = \frac{V1 * A1}{A2}$$

Donde la $V2$ hace referencia a la velocidad en el ducto y $V1$ es la velocidad de la cámara de resonancia.

Sabiendo que el área transversal de la cámara de resonancia es $A1 = 0.0144 \text{ m}^2$ y que el área del ducto es $A2 = 0.0005067 \text{ m}^2$ obtenemos los valores de velocidad para las condiciones de operación representados en la tabla siguiente.

Tabla 10. *Parámetros de operación de la turbina Wells.*

Velocidad (m/s)	Presión (Pa)	Densidad [Kg/m^3]	Viscosidad [Kg/m*s]
19,6089	3513	1,225	$1.7894*10^{-5}$
15,687	3736	1,225	$1.7894*10^{-5}$
11,7654	3959	1,225	$1.7894*10^{-5}$

7,8935	4182	1,225	$1.7894 \cdot 10^{-5}$
3,9218	4405	1,225	$1.7894 \cdot 10^{-5}$
0	4628	1,225	$1.7894 \cdot 10^{-5}$

Una vez realizada la simulación correspondiente para cada valor de coeficiente de velocidad, encontramos el siguiente comportamiento.

Tabla 11. Coeficientes de torque, presión y eficiencia según el coeficiente de flujo.

U	Coeficiente de Torque	Coeficiente de Presión	Eficiencia.
0	0	0	0
1,474	1,127	74,29	0,474
2,968	3,943	290,6	0,21
4,423	9,576	647,7	0,154
5,898	17,47	1145	0,1193
7,372	2,732	1782	0,0095

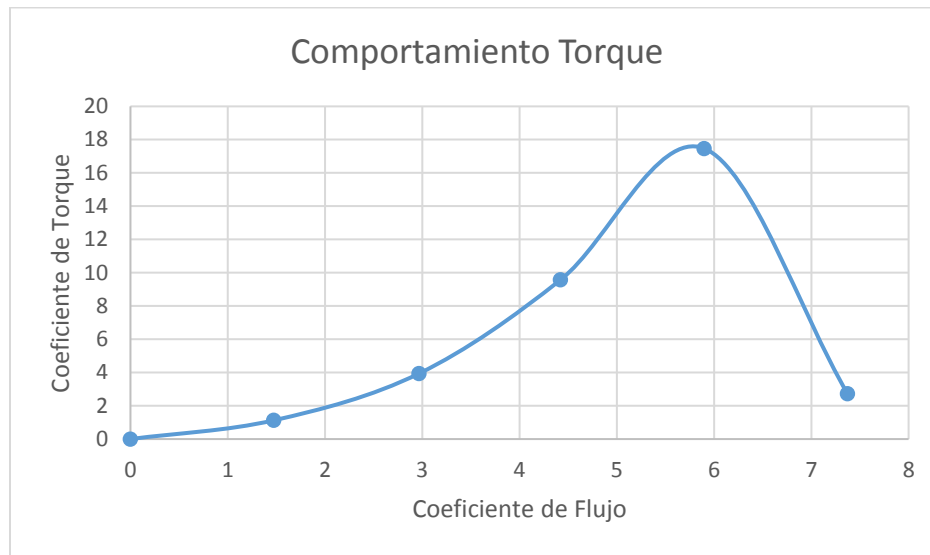
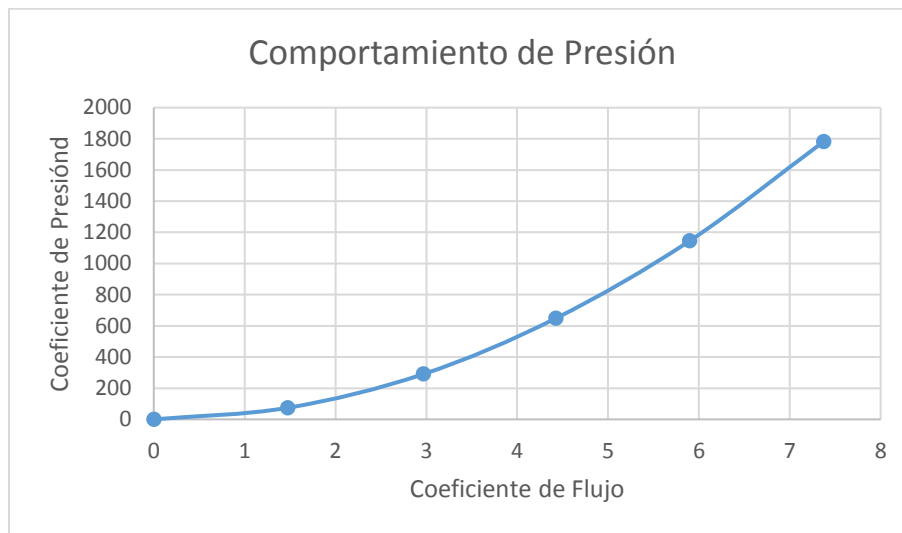
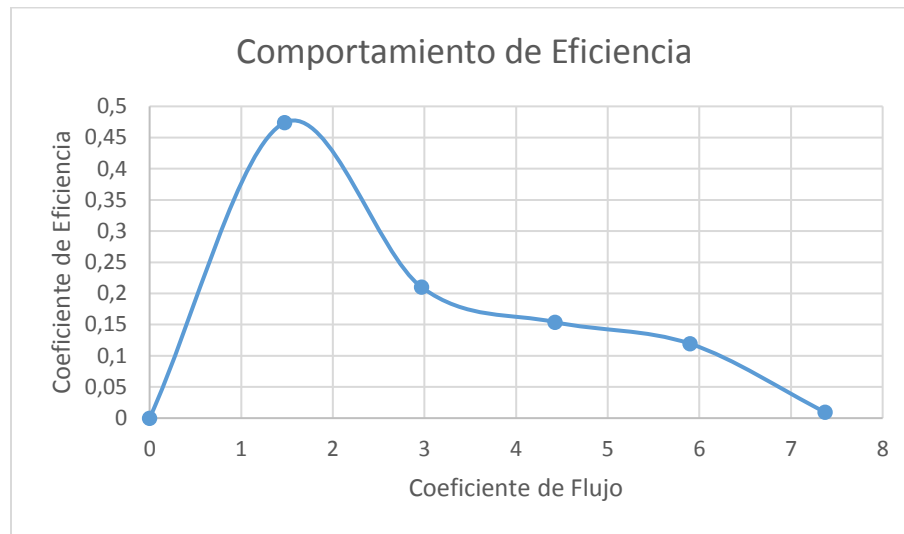
Figura 48. *Coefficiente de torque del nuevo diseño.***Figura 49.** *Coefficiente de presión del nuevo diseño.*

Figura 50. Eficiencia del nuevo diseño.

En las figuras 48,49 y 50, podemos observar los parámetros adimensionales T^* , P^* , η en función del coeficiente de flujo, y cómo, tras realizar la simulación con las condiciones establecidas anteriormente obtenemos un comportamiento idóneo respecto a la validación del modelo realizado. Sin embargo, hay que recalcar que por teoría se menciona que las turbinas Wells tienen mayor rendimiento a bajos coeficientes de flujo alcanzando eficiencias hasta de 60% en comparación a los nuevos resultados que alcanzan una eficiencia máxima de 47%. Esto se debe a los altos valores del coeficiente de flujo, provocando que el rendimiento disminuya en el convertidor OWC-MDS.

5.3.4 Cálculo de potencia extraída

Gracias a los resultados hallados en la simulación se procede a calcular la máxima potencia posible extraída de la turbina Wells para el convertidor OWC-MDS en el punto más alto de la eficiencia. Para ello se establece la siguiente ecuación para determinar la potencia en la turbina. (Santa et al., 2002)

$$W_1 - W_2 = U \cdot (2\pi r dr) \left((P_1 - P_2) - \frac{1}{2} \rho \cdot U_t^2 \right)$$

El siguiente término, representa el trabajo entregado por el fluido.

$$(P_1 - P_2) 2\pi r \cdot dr \cdot U$$

Donde.

$$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_t^2 \right) 2\pi r \cdot dr \cdot U$$

Representa energía cinética rotacional por unidad de tiempo, que se deja en la estela y la cual no se aprovecha en la extracción de energía. (Pinilla, 2001).

$$W = A \cdot V \cdot (P_2 - P_1)$$

Donde:

$$A = \pi R t i p^2 \cdot (1 - h^2) = 0,0002797 \text{ m}^2$$

Y tomando el punto de máxima eficiencia de los datos obtenidos mediante la simulación, se definen los siguientes datos:

$$V = 3,9218 \text{ m/s}^2$$

$$P_2 - P_1 = 4442,17 \text{ (Pa)}$$

$$W = 0,0002797 \cdot 3,9218 \cdot (4442,17) = 4,8727 \text{ (W)}$$

$$W = 4,8727 \text{ (W)}$$

6. CONCLUSIONES.

- Se realizó el estudio de los diferentes modelos encontrados en la literatura, seleccionamos la turbina de tipo WELLS, ya que es de las más implementadas debido a las condiciones de operación requeridas como el flujo bidireccional, además son de fácil construcción, fácil mantenimiento y muy eficientes bajo ciertas condiciones de operación.
- Se implementó el tipo de malla H de forma hexaédrica obteniendo una mejor distribución para todo el dominio computacional, donde se definieron 1.377.788 elementos con parámetros óptimos de calidad como la oblicuidad y ortogonalidad los cuales fueron cercanos a 1, siendo este el máximo, garantizando la convergencia y los cálculos de la simulación.
- Se validó el modelo seleccionado a través del software ANSYS 2020R1 y se logró determinar que los datos obtenidos en la simulación fuesen similares a los datos de la literatura, con un porcentaje de error cerca del 5% para la eficiencia, 2% en el coeficiente de presión y del 10% en el coeficiente de torque. Demostrando así que el proceso y postprocesamiento de la simulación fueron idóneos.
- Se simuló la turbina Wells para el tipo de convertidor OWC-MDS, con parámetros de operación en las cámaras a presiones que oscilan entre los 3513 y los 4405 [Pa], a velocidades que alcanzan valores de 0 a 0.69 [m/s], establecidas en la tesis guía. Se observa un comportamiento idóneo de torque, presión y eficiencia, la cual alcanza un valor máximo de 47%.
- Se comprobó mediante el proceso de simulación que el dispositivo OWC-MDS trabaja bajo condiciones de flujo muy variables con rango entre 0 y 7.372 los cuales son valores

altos para el tipo de turbina; por ende la eficiencia en la turbina Wells decae demasiado rápido a valores de 0.95 % en todo el ciclo de trabajo.

- Se logró hallar la potencia máxima extraíble en la turbina Wells para el convertidor de energía undimotriz OWC-MDS de 4,872 Watts, gracias a los resultados extraídos de la simulación como la diferencia de presión que es de 4442, 17 [Pa] en el punto máximo de la eficiencia de la turbina.

7. SUGERENCIAS INVESTIGACIONES FUTURAS.

- Implementar los distintos dispositivos que modifican la turbina Wells como álabes con control de dirección o coronas directrices y así mejorar las condiciones de operación del flujo.
- Utilizar las turbinas de impulso puede ser una opción bastante viable ya que ellas trabajan en un rango de coeficiente de flujo más alto.
- Modificar la geometría de los ductos del convertidor OWC-MDS, ya que al aumentar su diámetro obtenemos una velocidad de flujo menor, disminuyendo considerablemente su coeficiente de flujo.
- Diseñar un prototipo a escala con el fin de seguir el estudio del convertidor OWC-MDS.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amundarain Ormaza, M. (2012). La energía renovable procedente de las olas. *Ikastorratza, e-Revista de Didáctica*, 8, 1–14.
- Andrés, C., Castro, B., Alfredo, E., & Cruz, N. (2015). *Identificación Del Modelo De Turbulencia Más Adecuado, Utilizando Software De Dinámica De Fluidos Computacional, Para El Diseño Del Vehículo Urbano De La Competencia Shell Eco Marathon*. <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/138659.pdf>
 - Ansys. (2020). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide* (Issue January).
 - ANSYS Inc. (2020). ANSYS ICEM CFD User Manual. *Knowledge Creation Diffusion Utilization*, 15317(Enero), 724–746.
 - BP. (2020). *Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing*. 66. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
 - *Consecuencias del Uso de Combustibles Fósiles | Twenergy*. (n.d.). Retrieved March 17, 2021, from <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/medio-ambiente/la-electricidad-frente-al-combustible-2734/>
 - Curran, R., & Gato, L. M. C. (1997). The energy conversion performance of several types of Wells turbine designs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 211(2), 133–145. <https://doi.org/10.1243/0957650971537051>
 - Daly, J., Thakker, A., Frawley, P., & Sheik Bajjeet, E. (2002). A 3D computational fluid dynamics analysis of the wells turbine. *Proceedings of the International Conference on*

- Offshore Mechanics and Arctic Engineering* - *OMAE*, 4(1), 471–479.
<https://doi.org/10.1115/OMAE2002-28255>
- Das, T. K., Halder, P., & Samad, A. (2017). Optimal design of air turbines for oscillating water column wave energy systems: A review. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(1), 37–49. <https://doi.org/10.1177/1759313117693639>
 - Dominguez, M. (2018). *Análisis de desempeño de un dispositivo para la conversión de la energía del oleaje por oscilación de columna de agua (OWC)*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
 - Falcão, A. F. O., & Gato, L. M. C. (2012). Air turbines. In *Comprehensive Renewable Energy* (volumen 8, Vol. 8, Issue January 2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00805-2>
 - *File:Clasificación de captadores de energía de las olas según su ubicación.PNG - Wikimedia Commons.* (n.d.). Retrieved March 17, 2021, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clasificación_de_captadores_de_energía_de_las_olas_según_su_ubicación.PNG
 - Ghisu, T., Cambuli, F., Puddu, P., Mandas, N., Seshadri, P., & Parks, G. T. (2018). Numerical evaluation of entropy generation in isolated airfoils and Wells turbines. *Meccanica*, 53(14), 3437–3456. <https://doi.org/10.1007/s11012-018-0896-1>
 - Gutierrez, J. (2016). *Aprovechamiento de la energía de las olas*. *Energía undimotriz*. Universidad de La Laguna.
 - HENAO, D. A. R. (2008). *ESTUDIO DE UNA TURBINA WELLS DE BAJO NÚMERO DE REYNOLDS*. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.
 - Hurtado, H., & Mejía, J. (2006). *Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz*

en la Costa Colombiana. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

- Ibarra Berastegi, G., Sáenz, J., Garcia soto, C., Ulazia, A., Serras, P., & Ganix, E. (2018). *Electricity production , capacity factor , and plant ef fi ciency index at the Mutriku wave farm (2014 – 2016)*. 147(October 2017), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.018>
- IRENA. (2020). *Fostering A Blue Economy, Offshore Renewable Energy*. In *The International Renewable Energy Agency*.
- IRENA – *International Renewable Energy Agency*. (n.d.). Retrieved March 17, 2021, from <https://www.irena.org/>
- Kumar, P. M., Halder, P., Husain, A., & Samad, A. (2019). Performance enhancement of Wells turbine: Combined radiused edge blade tip, static extended trailing edge, and variable thickness modifications. *Ocean Engineering*, 185(May), 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.041>
- Manuel García Díaz. (2016). “ *Análisis de un sistema OWC twin turbines con turbinas radiales .*” UNIVERSIDAD DE OVIEDO.
- Martínez, D. (2019). *Análisis Numérico del Flujo Turbulento sobre el perfil NACA 1408*. Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Okuhara, S., Takao, M., Takami, A., & Setoguchi, T. (2013). Wells Turbine for Wave Energy Conversion —Improvement of the Performance by Means of Impulse Turbine for Bi-Directional Flow. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 03(02), 36–41. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2013.32a006>
- Orozco-cantos, L. S., & Pozo-safla, E. R. (2018). *Modelización CFD para determinar el comportamiento del fluido en tuberías de PVC CFD modeling to determine the behavior of the fluid in PVC pipes Modelagem CFD para determinar o comportamento do fluido em tubos*

- de PVC* (Vol. 4).
- Patricio, P. (2013). *Estudio del flujo en un grupo turbinado de dos turbinas axiales unidireccionales para centrales owc.*
 - Pereiras, B. (2008). Estudio de una turbina de impulso radial para el aprovechamiento de la energía del oleaje. In *University of Valladolid, Ph.D Thesis* (Issue April).
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/13605/1/TFG-O567.pdf%0Ahttp://uvadoc.uva.es/handle/10324/13253>
 - Perez Zapata, J. (2018). Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano. *Espacios*, 39(3). <https://doi.org/10.17081/invinno.5.2.2758>
 - Pinzón Paz, S. (2013). El perfil alar y su nomenclatura NACA. *Ciencia y Poder Aéreo*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.4>
 - Raghunathan, S. (1995). The wells air turbine for wave energy conversion. *Progress in Aerospace Sciences*, 31(4), 335–386. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00001-F](https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00001-F)
 - Rios, O., & Rocha, B. (n.d.). *Turbinas de aire para convertidores de energía undimotriz del tipo columna de agua oscilante sumergida (Revisión) Air turbines for wave energy converters OWC-submerged (Review)*. 1–8.
 - Robles corpa, A. (2015). *Diseño de perfiles aerodinámicos mediante metodología inversa*. Universidad de Sevilla.
 - Santa, A., Lozano, M., & Pinilla, A. E. (2002). Generación De Energía Eléctrica Con Turbinas Wells. *Universidad de Los Andes*, 15, 56–64.
<https://doi.org/10.16924/riua.v0i15.528>
 - Schallenberg, J. C., Gonzalo, R., Izquierdo, P., Hernández Rodríguez, C., Unamunzaga, P., Ramón, F., Déniz, G., Díaz, M., Delia, T., Pérez, C., Martel Rodríguez, G., Pardilla, J.,

- Vicente, F., & Ortin, S. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética* (S. . Instituto tecnologico de Canarias (Ed.); Primera ed).
- Taha, Z., Sugiyono, & Sawada, T. (2010). A comparison of computational and experimental results of Wells turbine performance for wave energy conversion. *Applied Ocean Research*, 32(1), 83–90.
 - <https://doi.org/10.1016/j.apor.2010.04.002>
 - Torresi, M., Camporeale, S. M., & Pascazio, G. (2009). Detailed CFD analysis of the steady flow in a wells turbine under incipient and deep stall conditions. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 131(7), 0711031–07110317. <https://doi.org/10.1115/1.3155921>
 - Torresi, M., Camporeale, S. M., Strippoli, P. D., & Pascazio, G. (2008). Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine. *Renewable Energy*, 33(4), 735–747. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.006>
 - Utrilla Noriega, P. (n.d.). *Validación de resultados mediante cfd* (pp. 96–109).
 - Vega, V. (2011). *Simulación CFD de la entrada de aire de un motor a reacción*. Universidad Politécnica de Catalunya.