



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

ANÁLISIS DE LA AERODINÁMICA DE UN GAS REAL EN UNA CAMARÁ DE AGUA OSCILANTE

Tesis que para obtener el grado de Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables

Presenta:

Ing. José Miguel Ochoa Alva

Asesor:

Dr. Agustín Mora Ortega

Ecatepec de Morelos, Estado de México, Diciembre del 2019



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO

**DICTAMEN DE LIBERACIÓN DE PROYECTO
DE TESIS**

FO-TESE-DA-90
TIT05-ANEXO PM



DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

Fecha: 19 DE DICIEMBRE DE 2019

Datos generales

Nombre del alumno:

OCHOA

ALVA

JOSÉ MIGUEL

Apellido paterno

Apellido materno

Nombres (s)

Matrícula: 201721242

PROYECTO: ANÁLISIS DE LA AERODINÁMICA DE UN GAS REAL EN UNA COLUMNA DE AGUA OSCILANTE

DIRECTOR: DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA

Dictamen:

Con base en el registro No. POSG-MPEER/DIMMI/2019/05 correspondiente al periodo escolar 2019-1, asignado al proyecto de tesis ANÁLISIS DE LA AERODINÁMICA DE UN GAS REAL EN UNA COLUMNA DE AGUA OSCILANTE y presentado por el alumno referido; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI (X) NO () han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

NINGUNA

Comité tutorial

DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA

DRA. MARÍA BELEN ARCE VAZQUEZ

M. EN C. JOSÉ CARLOS ALEJANDRO
AGUILAR ANASTACIO

M. EN DO. HÉCTOR RODRÍGUEZ CARMONA

Elaboró: DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA Coordinador de Posgrado	Revisó y Visto Bueno: M. EN DO. HÉCTOR RODRÍGUEZ CARMONA Jefe de División	Enterado: M. EN C. ARMANDO ALCALDE MARTÍNEZ Director Académico
--	---	--

Dedicatorias

Este trabajo es dedicado:

A **mi esposa**, por su amor, apoyo y motivación para terminar esta etapa, por su hermosa compañía y sus sacrificios para ayudarme a terminar con mis metas.

A **mis padres**, por el amor incondicional, apoyo que me han dado, los valores y educación que me han inculcado y sus consejos para fortalecer mi ser.

A **mis hermanos**, por sus consejos y su apoyo en el transcurso de esta etapa y de la vida.

A **mis amigos y familiares**, por su apoyo, moral y cariño.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi asesor, el **Dr. Agustín Mora Ortega**, por su paciencia y enseñanzas, por guiarme para obtener este grado académico y por sus consejos.

De igual manera, me gustaría agradecer al **Dr. Martín Salazar Pereyra**, por sus consejos, guía y oportunidad de ingresar al *Posgrado*.

Gracias al **Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec** por el ingreso a las instalaciones, al igual que un agradecimiento por la aceptación al *Posgrado*, las enseñanzas, consejos y apoyo de los profesores, **Dra. María Belen Arce Vazquez, M. en C. José Carlos Alejandro Aguilar Anastacio, Dr. Jesús de la Cruz Alejo** y al **M. en C. Wenceslao Bonilla Blancas** Profesorado de la **Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables (MEEER)** y por concluir una meta más en mi vida con un mejor conocimiento en el área de Eficiencia Energética y de las Energías Renovables.

Un agradecimiento grato al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por el apoyo económico para el inicio y conclusión del *Posgrado*.

A los compañeros del **Laboratorio J-201** de la generación **2016**, al **Ing. David Sánchez Luna** por su apoyo, al **Ing. Ladislao Eduardo Méndez Cruz (Prof Ladis)** por sus consejos, apoyo y amistad.

Gracias a **Mi Esposa, Padres, Amigos y Familiares** por el apoyo en el transcurso de esta etapa.

iii GRACIAS POR TODO !!!

Índice

1. Abstract	VIII
2. Resumen	IX
3. Motivación	X
4. Objetivos	XI
4.1. Objetivo General	XI
4.2. Objetivos Particulares	XI
5. Introducción	1
5.1. Panorama Mundial	2
5.2. Panorama Nacional	4
5.3. Antecedentes	7
5.4. Clasificación de dispositivos transformadores de energía del oleaje.	7
6. Análisis aerodinámico de Turbina de Impulso	16
7. Resultados del análisis aerodinámico	24
8. Conclusión	33
9. Bibliografía	34

Índice de figuras

1.	Consumo Mundial de Energía	3
2.	Potencial Energético en México (Energia, 2017-2018)	4
3.	Zona de Aprovechamiento Energético Oceánico de México (SENER, 2017)	5
4.	Altura de la Onda de la Ola (Con material de earth.nullschool.net)	6
5.	Esquema del convertidor de energía Wave Dragon.	8
6.	Prototipo del convertidor de energía Pelamis, desarrollado en la costa norte de Portugal.	8
7.	Versión del Duck Salter 1979 equipado con giroscopios.	9
8.	Prototipo PowerBuoy en Santoño, España, en 2008.	9
9.	Prototipo de un sistema Tapchan.	10
10.	Esquema de un sistema de bombeo péndulo.	11
11.	Prototipo de una OWC construida en PortKembla en New South Wales, Australia.	11
12.	Perfil NACA 0015	17
13.	Perfil Media Luna para Turbina de Impulso	18
14.	Comportamiento bidireccional del flujo de trabajo	19
15.	Triángulo de velocidades de entrada y salida respectivamente	21
16.	Parámetros de diseño del a) Perfil de media luna y b) alineador del flujo	22
17.	Rotor de la Turbina de Impulso	22
18.	Bi-Turbina de Impulso	23
19.	Simulación del movimiento de los alabes (a)	27
20.	Simulación del movimiento de los alabes (b)	28
21.	Simulación del movimiento de los alabes (c)	28
22.	Simulación del movimiento de los alabes (d)	29
23.	Simulación del movimiento de los alabes (e)	30
24.	Simulación del movimiento de los alabes (f)	30
25.	Simulación del movimiento de los alabes (h)	31
26.	Simulación del movimiento de los alabes (i)	31

Índice de cuadros

4.	Triángulo de entrada de Primera y Segunda Turbina de Impulso	25
5.	Triángulo de salida de Primera y Segunda Turbina de Impulso	26
6.	Potencia de salida de Primera y Segunda Turbina de Impulso	26

Nomenclatura

Letras latinas

<i>b</i>	Espesor del rotor
<i>c</i>	Velocidad absoluta
<i>D</i>	Diámetro
<i>LIMPET</i>	Land Installed Marine Powered Energy Transformer (Transformador de Energía Marina Instalado en Tierra)
<i>m</i>	Metros
<i>OWC</i>	Oscillating Water Column (Columna de Agua Oscilante)
<i>PTO</i>	Power Take Off (Potencia de salida)
<i>rpm</i>	Revoluciones por minuto
<i>Re</i>	Reynolds del fluido de trabajo
<i>s</i>	Segundos
<i>u</i>	Velocidad tangencial (Velocidad del rotor)
<i>w</i>	Velocidad relativa
<i>W</i>	Watts
<i>Wh</i>	Whatt hora
<i>WEC</i>	Wave energy converter (Convertidor de energías de las Olas)

Letras Griegas

α	Angulo de ataque del perfil aerodinámico
ν	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad

Subíndices

- 1 Entrada al sistema en el diámetro interno del rotor
- 2 Salida del sistema en el diámetro externo del rotor

a Aire

1. Abstract

In this work, the aerodynamic study of an impulse turbine is presented, for a Wave Energy Converter (WEC) known as Oscillating Water Column (OWC), for continuation of the maximum power, of the dimensions of the chamber and of the turbine, for a numerical analysis, using data from the prototype of the 500 kW device (LIMPET) installed on the Hebridean island of Islay. A parametric analysis of a double rotor impulse turbine with a half moon aerodynamic profile is presented, compared to a Wells type turbine. The results reveal a 12% increase in the conversion efficiency of the impulse turbine compared to the Wells type turbine.

2. Resumen

En este trabajo, se presenta el estudio aerodinámico de una turbina de impulso, para un dispositivo de Convertidor de Energía de Oleaje (WEC por sus siglas en inglés) conocido como Columna de Agua Oscilante (OWC por sus siglas en inglés), para la obtención de la máxima potencia, considerando las dimensiones de la cámara y de la turbina, para un análisis numérico, utilizando datos del prototipo del dispositivo de 500 kW (LIMPET) instalado en la isla Hebridean de Islay. Se presenta un análisis paramétrico de una turbina de impulso de doble rotor con perfil aerodinámico de media luna, se compara con una turbina tipo Well. Los resultados revelan un incremento en 12% en la eficiencia de conversión de la turbina de impulso comparada con la turbina tipo Well.

3. Motivación

Actualmente las posibilidades de adquirir energía eléctrica, es sumamente fácil, gracias al avance tecnológico para su distribución, bajo costo de producción, y por lo tanto, bajo costo de venta a la población, por lo que son factores importantes para el abastecimiento energético a los consumidores, pero actualmente, se da importancia a la reducción de producción de energía convencional, por la contaminación de la tierra, provocando un cambio climático en la atmósfera, por lo que se ha optado por el desarrollo de energías alternas, abriendo las puertas del desarrollo de energías a través de la transformación de recursos naturales o energía del ambiente a energía eléctrica, este tipo de energías pueden satisfacer las necesidades básicas del ser humano, por lo que son el futuro sustento de la población mundial.

Un elemento para la producción de energía eléctrica a través de energías alternas, es la Energía Undimotriz o Energía Olamotriz, considerado un recurso ilimitado de la energía del planeta, se puede tener un gran valor para la producción de electricidad a través de este recurso natural, para el abastecimiento a la población cercana a los océanos, proporcionando energía eléctrica, considerado ya un fenómeno vital para el ser humano y evitar el consumo de combustibles fósiles.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Mejorar la eficiencia y aumentar la potencia de una columna de agua oscilante con una turbina de flujo bidireccional, para su uso como fuente alterna de energía.

4.2. Objetivos Particulares

- Diseñar una turbina con mayor aprovechamiento energético de la oscilación del flujo de fluido de trabajo.
- Analizar numéricamente la aerodinámica de la cámara de aire.
- Obtener la potencia de una Columna de Agua Oscilante con una turbina bi-direccional.
- Comparar los resultados obtenidos al usar una Turbina bi-direccional y una Turbina tipo Wells.

5. Introducción

En este capítulo se abarca el panorama general de las energías renovables, considerando la importancia de sustituir la generación de energía a partir de combustibles fósiles con dispositivos que generen a partir de una mejor huella de carbono, otro punto a destacar para esta parte, es el lugar de la energía eólica en la generación de energía eléctrica, estableciendo el panorama mundial de esta energía y a su vez el panorama en México.

Una parte importante de este apartado, es revisar los fundamentos de la generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica, al igual que, el estado del arte conforme al sistema que se abarca para este trabajo, dando lugar a las recientes investigaciones que se han realizado en el mundo para poder generar nuevo conocimiento del área.

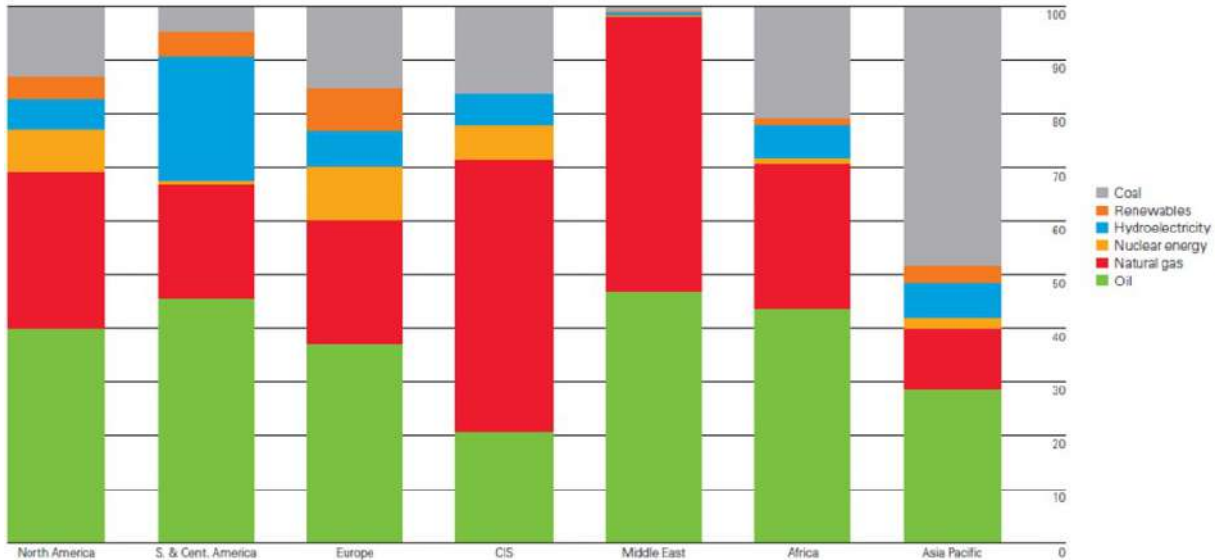
5.1. Panorama Mundial

En la actualidad existen estudios de gran magnitud para la innovación y desarrollo tecnológico en las energías renovables, pero a pesar de estos grandes avances, aún tienen deficiencias al transformar la energía, por lo que se deben ir aumentando la potencia energética de cada una de ellas. Considerando que para las energías renovables no es mucha la producción de energía eléctrica actual, aun así tienen una producción de 178 GW (Janet L. Sawin, 2018), por lo que ha tenido un gran desarrollo ante el mundo, sobre todo por la inversión a energías renovables para países subdesarrollados, puesto que existía la duda que muchos de los países en invertir para estas energías, se veía solo en países en desarrollo y países desarrollados. Cada vez más, los gobiernos sub-nacionales se están convirtiendo en líderes en iniciativas de energía renovable y eficiencia energética, al mismo tiempo, muchos países en desarrollo y emergentes están expandiendo su despliegue e inversión en energías renovables e infraestructura relacionada.

A partir de 2016, las energías renovables representaron un 18.2% del consumo total de energía final global, con las energías renovables modernas representando el 10.4% (Janet L. Sawin, 2018). La cantidad de países con objetivos de energía renovable y políticas de apoyo, aumentó nuevamente en 2017, y varias jurisdicciones hicieron que sus objetivos existentes fueran más ambiciosos. El fuerte crecimiento continuó en el sector de energía renovable, mientras que otros sectores crecieron muy lentamente. Las instalaciones con capacidad de energía solar fotovoltaica fueron notables, casi el doble que las de la energía eólica, agregando más capacidad neta que el carbón, el gas natural y la energía nuclear combinados. En el sector del transporte, el uso de biocombustibles aún se ve frenado por los debates sobre sostenibilidad, la incertidumbre política y el lento progreso tecnológico en combustibles avanzados, como en el caso de la aviación. Del mismo modo, la calefacción y la refrigeración renovable siguen rezagadas. Ambos sectores reciben mucha menos atención por parte de los responsables políticos que la generación de energía renovable. Sin embargo, la falta de atención política no refleja una importancia relativa, ya que la calefacción y la refrigeración representan el 48% del consumo final de energía, el transporte el 32% y la electricidad el 20% (Janet L. Sawin, 2018). La interconexión de energía, calefacción y refrigeración, y el transporte para integrar mayores participaciones de energía renovable ganaron mayor atención durante el año, en particular la electrificación tanto de la calefacción como del transporte.

Existen estudios donde los autores dividen en regiones el consumo energético, en la imagen anterior se presenta la grafica con estos valores, dando el porcentaje de consumo de

Regional consumption by fuel 2017
Percentage



Oil remains the dominant fuel in Africa, Europe and the Americas, while natural gas dominates in CIS and the Middle East, accounting for more than half of the energy mix in both regions. Coal is the dominant fuel in the Asia Pacific region. In 2017 coal's share of primary energy fell to its lowest level in our data series in North America, Europe, CIS and Africa.

Figura 1: Consumo Mundial de Energía

energía de cada zona. Al analizar los datos presentados por las energías renovables, es escaso a nivel mundial, por lo que da lugar a altos porcentajes a los combustibles fósiles, es por esta razón que se emplea el estudio para las energías renovables, para reducir el consumo de energías con combustibles fósiles. Cabe destacar por parte de Europa, es quien tiene mayor consumo energético a partir de las energías renovables, mientras que el Medio Oeste y Comunidad de Estados Independientes manteniendo primeros puestos en consumo de Gas Natural. Estos dos últimos, son un ejemplo claro del porque se necesita evitar el aumento de *Gases de Efecto Invernadero* en la atmósfera y porque es importante adquirir energía limpia.

5.2. Panorama Nacional

El panorama para las energías renovables en el país, se ve una alta inversión, puesto que contamos con una ubicación especial para la producción de energía a través de energías renovables, el potencial de nuestro país para energías limpias es alto, por lo que se debe contar con un alto nivel de estudio para todo tipo de generación de energía a partir de energías limpias.

A continuación, en la figura siguiente, se muestra el potencial de nuestro país, lo que se ha instalado y lo que aún nos queda por aprovechar.

Recursos	Geotérmica	Hidráulica	Eólica	Solar	Biomasa	Oceánica
Probado	2,610	4,920	20,104	25,052	3,326	-
Probable	45,207	23,028	-	-	680	1,057
Posible	52,013	44,180	87,600	6,500,000	11,485	-

Figura 2: Potencial Energético en México (Energia, 2017-2018)

Para el caso de la energía olamotriz se cuenta con pocos estudios a nivel mundial y nacional, por lo que actualmente se debe establecer una investigación constante para esta energía limpia, dando lugar al estudio de dispositivos de aprovechamiento energético a través de la transmisión energética de las olas a sistemas de transformación de energía.

En México es necesario lograr avances significativos con la finalidad de conseguir que las fuentes de energía renovable sean competitivas frente a las fuentes fósiles. Por lo tanto, su aplicación representa, para el país, un escenario de acceso a servicios de energía modernos con beneficios amplios, promoviendo la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero y el aceleramiento del desarrollo económico, tecnológico y científico.

Se cuenta principalmente con cinco formas de energía del océano que pueden ser aprovechadas para la producción de energía eléctrica:

- Corrientes marinas
- Mareas
- Oleaje
- Gradientes térmicos
- Gradientes salinos

En la siguiente figura se presenta el potencial de área del país, exponiendo tanto las costas como el área marítima de 3,149,920 Km² con un litoral continental de 11,122 Km, también se muestra en dicha imagen el porcentaje del área que puede ser aprovechado para 4 derivaciones de energía proporcionada por los océanos y mares, y a su vez, el aproximado de energía que puede ser obtenido por estas variaciones.



Figura 3: Zona de Aprovechamiento Energético Oceánico de México (SENER, 2017)

Para el caso de la energía obtenida a través del potencial de la superficie marítima, se presenta a continuación un mapa con la zona con mejores condiciones de altura marítima para la instalación de dispositivos de transformación de energía olamotriz en el país, cabe

destacar que, en toda el área del océano pacifico, puede establecerse sistemas de las mismas consideraciones, aunque con una menor altura.

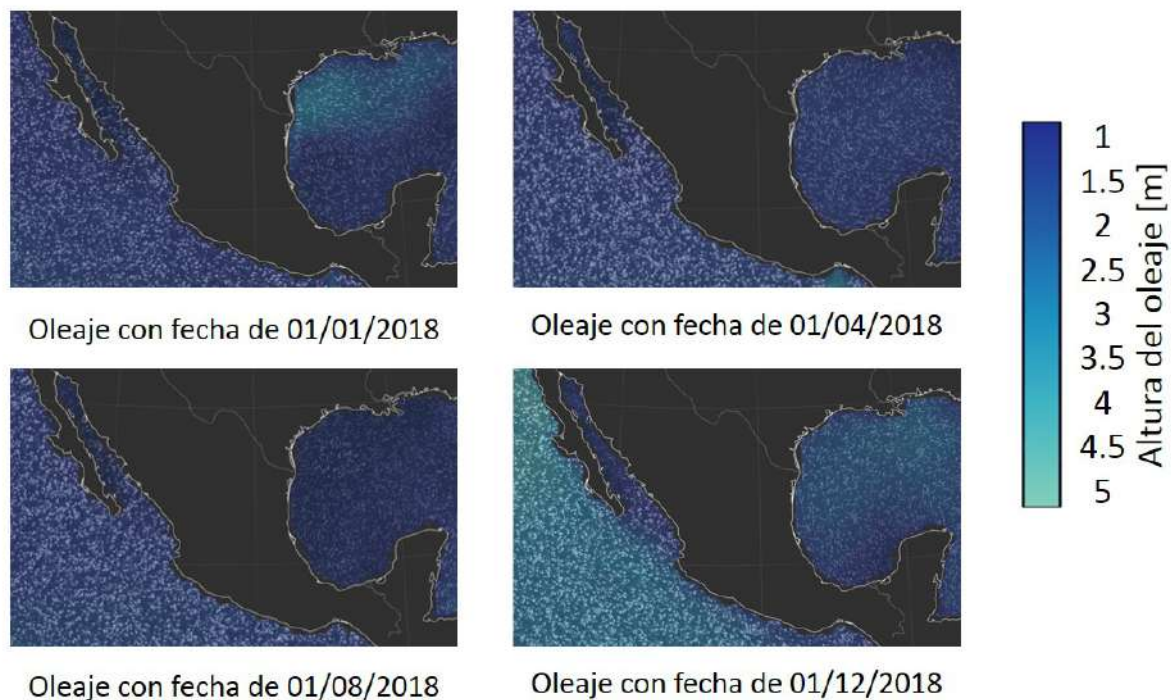


Figura 4: Altura de la Onda de la Ola (Con material de earth.nullschool.net)

Como se observa, en las costas de baja california norte, se encuentra el punto de mayor altura en los océanos del país, por lo que se consideraría como el punto clave para dispositivos ubicados estratégicamente para la producción de energía eléctrica.

5.3. Antecedentes

Las investigaciones más intensas, sobre el aprovechamiento de la energía del oleaje, fueron en la década de los 70 y 80 bajo programas promovidos por distintos gobiernos e industrias (Falcão, 2010). Para 1980 (Cruz, 2008) se habían registrado más de mil patentes, siendo presentada la primera en Francia en 1799, durante la época de la Revolución Francesa, por un padre e hijo de apellido Girard (Ross, 1995).

La incursión en el desarrollo de tecnologías basadas en la energía marítima ha estado fundamentada en el estudio y diseño de estructuras marítimas, cuya característica es la transformación de la energía del oleaje en mecánica y a su vez esta en eléctrica, se clasifican esencialmente en dos tipos, costeras (Shoreline) y de aguas profundas (offshore) (Clement, 2002 & Falcão, 2010) cada estructura presenta ventajas y desventajas, las cuales se evalúan según sean las condiciones de factibilidad económica y de construcción, que presente una determinada región.

5.4. Clasificación de dispositivos transformadores de energía del oleaje.

La clasificación de los dispositivos transformadores de energía del oleaje es de la siguiente forma:

Aguas profundas:

Estos dispositivos explotan los regímenes de oleaje más potentes, que se encuentran disponibles en profundidades superiores a los 40 m., condición en la cual los efectos disipativos no son representativos. Estas estructuras flotan sobre la superficie del mar y requieren de grandes extensiones de cableado para transportar la energía eléctrica, por otra parte, su mantenimiento requiere de infraestructura sofisticada dadas las condiciones de su ubicación.

Estas estructuras pueden sufrir daños como consecuencia de eventos meteorológicos extremos, con lo cual su vida útil puede quedar seriamente afectada, algunos ejemplos de los Dispositivos transformadores de energía del oleaje localizados en aguas profundas son:

El Wave Dragon es un convertidor de energía anclado en alta mar que se caracteriza por tener tres fases: absorción, almacenamiento y conversión. Este dispositivo puede ser instalado en forma individual o en un arreglo de varias estructuras similares. El primer modelo de laboratorio a escala, fue analizado por (Soerensen, 2000).

El convertidor de energía Pelamis, fue desarrollado en el Reino Unido, está compuesto

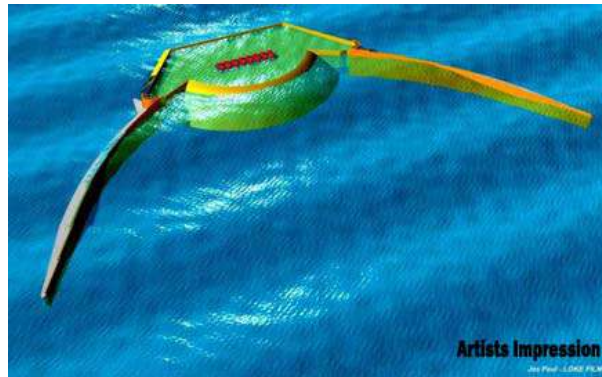


Figura 5: Esquema del convertidor de energía Wave Dragon.

por cuatro secciones cilíndricas conectadas entre sí. El oleaje acciona a los cilindros hidráulicos, los cuales están conectados a generadores eléctricos. De estos sistemas se han realizado diferentes pruebas a escalas (Henderson, 2006), uno de estos tuvo lugar sobre la costa del norte de Portugal en el segundo semestre del 2008, siendo el primero conectado en red en el mundo.



Figura 6: Prototipo del convertidor de energía Pelamis, desarrollado en la costa norte de Portugal.

El sistema Duck, probablemente es el dispositivo de alta mar, más conocido, este fue desarrollado en la década de los 70's y principio de los 80's (Salter, 1974), básicamente consiste en una cámara flotante, que gira alrededor de su propio eje. Las primeras versiones consistieron en una serie de Ducks montados en un eje horizontal, alineados en la dirección del frente de onda, conectados con un sistema hidráulico.

El siguiente dispositivo aplicado a la producción de energía undimtriz más tarde (Salter, 1974), fue el Duck como una estructura independiente, el cual tiene la característica de

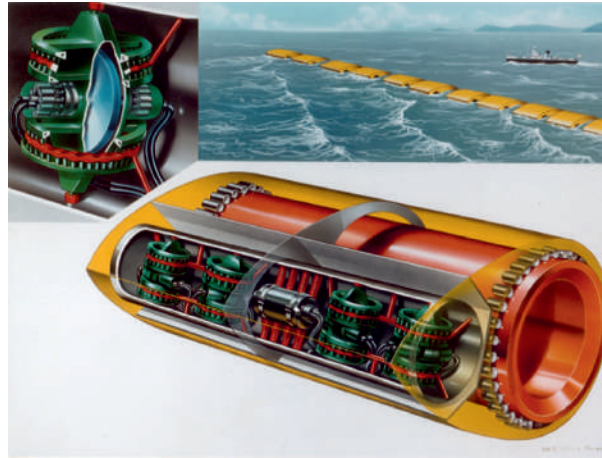


Figura 7: Versión del Duck Salter 1979 equipado con giroscopios.

contar con giroscopios, que le permiten una mejor estabilidad. En un sistema de boyas, la oscilación del oleaje permite una oscilación vertical, condición que genera un movimiento relativo entre el fondo del mar y los sistemas hidroneumáticos de las boyas (Budal, 1982), Los sistemas de boyas tienen la ventaja de poder colocarse como un arreglo, dado que estas no transforman significativamente el oleaje, en virtud de que sus dimensiones son pequeñas en comparación con otras estructuras.



Figura 8: Prototipo PowerBuoy en Santoño, España, en 2008.

Costeros:

Estas estructuras se encuentran sobre la línea de costa y tienen la ventaja de una instalación y mantenimiento fácil. Debido a que se encuentran empotrados en el suelo, su estructura no requiere de anclajes, no es necesario grandes longitudes de cableado para transportar la energía eléctrica, sin embargo, debido a las condiciones de fricción en el fondo del mar y a

efectos de rotura del oleaje, la estructura disminuye su eficiencia. Otras condiciones que deben tomarse en cuenta y que podrían ser contras de estas estructuras son los requerimientos geológicos de la línea de costa, preservación del escenario costero, rangos de marea, entre otras condiciones.

Algunos ejemplos de dispositivos transformadores de energía costeros son el sistema Tapchan (Tapered Channel), (Fredriksen, 1985), el cual consiste en un canal esbelto que proporciona agua a un embalse que se encuentra en un nivel más alto que el nivel medio del mar, cuando el embalse se llena, este transforma su energía potencial en cinética y acciona una turbina tipo Kaplan.

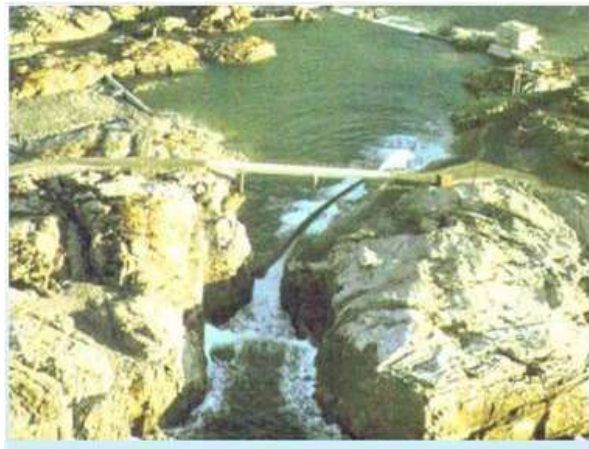


Figura 9: Prototipo de un sistema Tapchan.

El péndulo Es un sistema que consiste en una caja rectangular, que en uno de sus extremos está abierta al mar. Una pared articulada en la parte superior de la caja, sirve como péndulo, esta es accionada por la incidencia del oleaje, su movimiento oscilatorio es usado como un sistema de bombeo. Varios prototipos se han construido en Japón y existen planes para desarrollar una planta más grande (Kraemer, 2000).

Una de la estructura que con mayor frecuencia se ha estudiado es la Columna de Agua Oscilante (OWC por sus siglas en ingles), por su sencillez geométrica, escaso impacto ambiental, mantenimiento económico y puede ser construida en cualquier región costera. La forma geométrica de esta es cilíndrica y hueca con una sección transversal que puede tener cualquier forma, se encuentra parcialmente sumergida, permitiéndole tener una conexión directa con el mar; parte de su interior está ocupado por aire, el cual se comprime o expande según sea la oscilación de la columna de agua generada por las fluctuaciones del oleaje, el

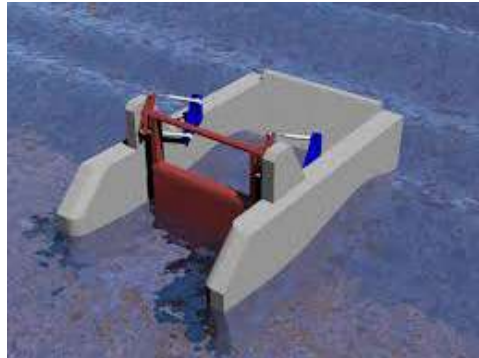


Figura 10: Esquema de un sistema de bombeo péndulo.

aire comprimido se expulsa a través de una tobera, que lo conduce hasta una turbina.



Figura 11: Prototipo de una OWC construida en PortKembla en New South Wales, Australia.

La OWC fue inicialmente estudiada por (Masuda, 1987), quien fijó los precedentes del uso comercial de la energía del oleaje. Una OWC puede ser construida sobre la línea de costa (onshore) columna de agua oscilante fija (Clement, 2002) o bien puede ser una estructura flotante (offshore) columna de agua oscilante flotantes (Falcão, 2010). El primer tipo de OWC presenta ventajas sobre los flotantes, debido a que estas no requieren de cableado para transmitir la energía eléctrica y el costo de mantenimiento es inferior.

El oleaje es un fenómeno que se presenta en cualquier región costera, y su potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud y el periodo de oscilación. Por lo tanto, para periodos ($\sim 7 - 10$ s) y amplitudes largas (~ 2 m), tienen un flujo de energía promedio entre 40 y 70 kW por metro de ancho de la onda. Cerca de la costa de la intensidad energética promedio de una onda disminuye, debido a la interacción con el fondo del mar; sin embargo, dicha disipación de energía puede ser compensada por fenómenos naturales, tales como la

refracción o la reflexión, lo que lleva a la concentración de la energía (Clement, 2002), en este sentido (Whittaker, 1993) llevaron a cabo experimentos para estudiar la hidrodinámica de la OWC en estructuras onshore y offshore, ellos concluyeron que si la forma de amortiguamiento del oleaje (fondo marino) es seleccionado adecuadamente, la cantidad de energía útil presenta un incremento del doble en estructuras onshore, si se compara con una estructura offshore.

La eficiencia de conversión de estos dispositivos depende fuertemente de la geometría de la estructura OWC's y el movimiento de las olas del mar. Durante muchos años, los científicos e ingenieros han explorado y desarrollado prototipos de tamaño completo de OWC, como es el construido en Noruega en Toftestallen en 1985, esta central fue diseñada para producir 1 MW de potencia eléctrica máxima, con un promedio de 500 kW. Los costos proyectados de la energía eléctrica están en el rango de 0.04 a 0.05 USD por kWh. Con ambos avances en la tecnología y la producción en masa se prevé que, estos costos de energía caerán a un rango de 0.03 a 0.04 USD (Bonke, 1986); el proyecto titulado: "European Wave Energy Pilot Plant Pico", con una capacidad instalada de 400kW (Falcão, 2000), fue instalado en la isla Pico, Azores Portugal en 1999. En combinación con el financiamiento privado el Wave Power Team en la Universidad Queen de Belfast en asociación con Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton y I.S.T. Portugal diseñaron y construyeron la central de potencia conocida como LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter), con una capacidad instalada de 500 kW. Dicha planta de generación se instaló entre 1998 y 2000 en la isla de Islay en la costa oeste de Escocia y entró en servicio en la primavera de 2001. La planta ha estado operando de forma remota desde ese momento y es parte del suministro de energía a la red eléctrica en el Reino Unido (Heath, 2000).

En la actualidad, se han realizado estudios para aumentar el rendimiento de las energías renovables, en especial, para el caso de los sistemas de WEC, por lo que algunos investigadores proponen una metodología para su estudio, dando lugar al análisis experimental de diferentes enfoques y así establecer las fortalezas y debilidades de cada uno, dando a conocer los mejores resultados de las aproximaciones a casos reales de los sistemas, proporcionan la metodología apropiada al sistema WEC a analizar y estableciendo desde primera instancia el rendimiento del sistema (Rodríguez, Rosa-Santos, & Taveira-Pinto, 2018). La importancia y posible aprovechamiento energético de sistemas ligados a la oscilación marítima, ha llevado a establecer que tipos de WEC's pueden proporcionar un mejor aprovechamiento de esta energía, por lo que ha llevado a investigadores a analizar los sistemas, consiguiendo ver que

sistemas tienen deficiencias en sistemas con cuerpo oscilante, proporcionando así una potencia de salida menos eficiente por encontrarse fuera de la resonancia y con dimensiones menores, por lo que desarrollan un análisis de sistemas con diferentes subsistemas de Potencia de salida (PTO por sus siglas en inglés), a partir de este análisis llegan a la conclusión que sistemas de PTO bi-estables mejoran la potencia para ondas regulares de baja frecuencia (Xiao, & Peng, 2017).

Por otra parte, se han proporcionado estudios para los sistemas WEC's en el aumento de la PTO, algunos de estos estudios buscan el aumentar el despegue de potencia, basándose en un punto de absorción, esto es a partir de una optimización de la PTO en un modelo de pérdidas en la transformación de energía (Nielsen, Pedersen, Andersen, & Ambühl, 2017). En ocasiones, se usa aumento de PTO considerando sistemas con aceite, aunque para estos dispositivos deben estar en condiciones extremas en los componentes de PTO, y una disminución indeseable en la eficiencia general del mismo (Gaspar, Calvário, Kamarlouei, & Soares, 2018). Para algunos investigadores es indispensable realizar estudios a partir de diferentes métodos y así encontrar ecuaciones apropiadas para el comportamiento real de las WEC's, por ejemplo en el estudio hecho a partir del acoplamiento del modelo Hamiltoniano con interacción a la estructura de onda descrita por la ecuación de Cummins, se establece un modelo matemático para el estudio a cualquier tipo de WEC (Almuzakki, 2018).

Como se sabe, la Columna de Agua Oscilante (OWC por sus siglas en inglés), es un dispositivo que forma parte del grupo de sistemas WEC, dando lugar a diversos estudios para aumentar su PTO proporcionado por la turbina dentro de la columna, para este dispositivo se ha proporcionado prototipos con diferentes variaciones en su diseño, y a su vez, se realizan análisis tanto numéricos como analíticos para establecer que sistema es el de mejores dimensiones, un ejemplo claro del análisis de la variación del diseño del sistema, es que a partir de la placa frontal de la OWC se modifica dando así una optimización dimensional de manera experimental, al igual que el cambio de ángulo del mismo (Chang, Chou, Chen, Hsieh, & Chang, 2016) o a su vez, variando las dimensiones o estudiando de manera experimental de las OWC (Vyzikas, 2017). En algunas ocasiones analizar la columna de agua oscilante con una cámara puede ser aprovechada una parte de la energía, por lo que en ocasiones existen estudios que implementan la modificación de la OWC, como por ejemplo añadir una segunda cámara, después de un escalonamiento en el fondo de la OWC, para aprovechar más la energía proporcionada por la oscilación del agua, este proceso se realizó tanto analítico como numérico dando así mejores resultados en comparación de OWC con y

sin variación de fondo y OWC con doble cámara de aire (Rezanejad, Bhattacharjee, & Guedes Soares, 2015). Otros tipos de modificaciones a las OWC, puede ser la variación de forma al extremo de la OWC, dando una forma en U, llamado UREWEC, alcanzando una frecuencia estable, con la variación de líquido en el tubo en forma de U añadido a la OWC (Liu, 2016). A pesar de sus variaciones en cambios a la OWC, como la variación del ángulo de inclinación y optimizando las dimensiones para un mejor flujo volumétrico por una prolongación de la resonancia (Iino, Miyazaki, Segawa, & Iida, 2016), la variación del fondo en un OWC, considerando una curvatura, llegando al análisis de que dicha curvatura, con medida de 0.71, obtuvo la eficiencia hidrodinámica alta (John Ashlin, Sundar, & Sannasiraj, 2016), el estudio de las camas marinas reales de la playa granada en España, analizando las perturbaciones del agua por dichas camas a una OWC, y a su vez, a una turbina (Medina-López, Bergillos, Moñino, Clavero, & Ortega-Sánchez, 2017), estudio numérico y experimental de la OWC y el amortiguamiento de la Turbina (Elhanafi & Kim, 2018), desarrollan de forma experimental o analítica el comportamiento de la OWC, pero en estos estudios no consideran la variación de temperaturas o gradiente de temperaturas, y a su vez, la variación de la humedad en las ecuaciones de cada una de estas investigaciones.

Al igual como se ha mencionado anteriormente, algunos estudios solo reflejan la variación del flujo en la turbina y su amortiguamiento del flujo, pero no se han estimado las dimensiones apropiadas conforme a la variación de estos dispositivos y a su vez analizarse con las variantes antes mencionadas para establecer un comportamiento real a condiciones ambientales para los dos casos a evaluar.

Se sabe que la turbina tipo Wells es de reciente creación, por lo que se han analizado variaciones en el diseño de esta turbina, como por ejemplo, el rediseño de la misma, colocando redireccionamientos de flujo, donde impacte de forma eficiente al álabe, como por ejemplo un NACA 0012, al igual que modificando el ángulo de ataque, modificando el tipo de álabe y con redireccionamiento (Setoguchi, Santhakumar, Takao, Kim, & Kaneko, 2003), otra forma es colocando alabes guía para aumentar el aprovechamiento energético del OWC (Takao & Setoguchi, 2012), a pesar de contar con variación de perfiles NACA o algún otro tipo de perfiles para álabes, se han realizado comparaciones de dos o más perfiles para establecer el mejor perfil para el aprovechamiento energético, de igual forma, como en esta turbina se generan álabes rectos, sin ninguna variación de ángulo con respecto a su posición normal a la circunferencia de la base del mismo, se han hecho estudios colocando una variación al álabe y así evitar turbulencias de flujo dentro de la turbina, aumentando la eficiencia hidráulica de

la Turbina tipo Wells (Halder, Rhee, & Samad, 2017; Rubel, Uddin, & Islam, 2016).

Al ver que se han realizado estudios en la aerodinámica de los diferentes perfiles de álabes, la variación de su estructura y a su vez analizando las modificaciones a una turbina simple para mejorar el flujo de la turbina, es importante establecer el número de álabes y a su vez el área del flujo dentro de la Turbina tipo Wells.

El consumo mundial de energía ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, y se incrementará en casi un ritmo similar. A demás añadiendo que los métodos tradicionales de producción de energía están contribuyendo a graves problemas ambientales. El sector de la energía se vio forzado a través de un proceso de renovación hacia las energías renovables. En la evolución dinámica de las energías renovables; la energía del oleaje está emergiendo. Aunque la tecnología es relativamente nueva, y actualmente no es económicamente competitiva con las tecnologías más maduras, como la energía eólica, el interés por parte de los gobiernos y la industria está en constante aumento. Una característica importante de las olas del mar es su alta densidad de energía, que es la más alta entre las fuentes de energía renovables.

6. Análisis aerodinámico de Turbina de Impulso

En este capítulo se presenta el análisis de dos turbinas de impulso para una OWC, aprovechando la energía del fluido de trabajo, proporcionando mayor generación de energía a partir de dos generadores, por el doble giro de las turbinas, es decir, estableciendo una con giro al sentido de las manecillas del reloj y la segunda al sentido contrario de las manecillas del reloj con dos ejes de transmisión concéntricos acoplados de la turbina al generador.

En la actualidad existen deficiencias en la generación de energía a partir de los dispositivos WECs, por lo que se busca aumentar la PTO de la turbina. A inicios del dispositivo OWC, se utilizaba Turbinas tipo Wells, proporcionando poca energía, por lo que se traduce a poco aprovechamiento energético de la oscilación del oleaje, estas turbinas como tal usan perfiles de álabes bidireccionales, dando lugar a que esta turbina puede aprovechar la energía proporcionada por el cambio de dirección del flujo de fluido de trabajo, este perfil es el mostrado en la siguiente Figura:

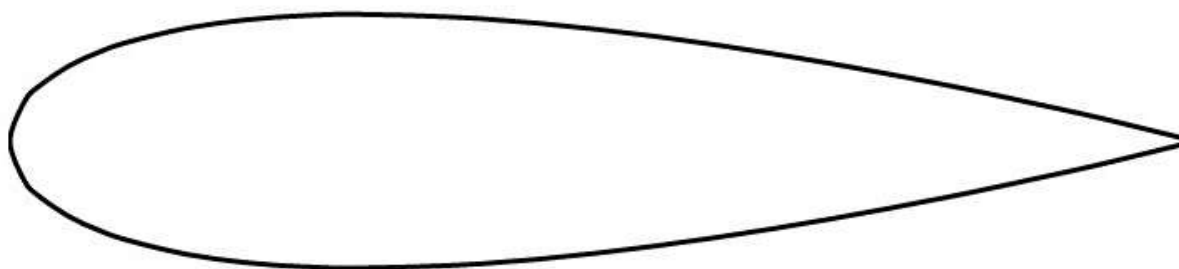


Figura 12: Perfil NACA 0015

Para las Turbinas de Impulso, se busca aumentar el rendimiento de la OWC, por que elevan el rango de la eficiencia de las turbinas y se considera la mejor manera de sustituir a la Turbina Wells, estas turbinas aprovechan mayormente la energía del fluido de trabajo.

Para este proyecto se pretende analizar la aerodinámica de un diseño de turbina de impulso con las condiciones de aprovechamiento energético de la bidirección del fluido de trabajo, y a su vez, estableciendo el aumento de la PTO proporcionado por este dispositivo. Considerando que esta turbina debe estar diseñada para proporcionar menor esfuerzo de giro del rotor de la turbina, y a su vez, considerando una bi-turbina, con diferente dirección de giro una de la otra, proporcionando una transferencia de energía a dos generadores eléctricos, de esta manera, se puede lograr el aumento de generación.

Un producto de este tipo de turbinas, es mayor en comparación de la Turbina tipo Wells, por lo que, al usar estos dispositivos en México es viable, por la existente problemática de la amplitud de onda de la ola y una altura de costa baja, por lo que se puede obtener menor presión dentro de la OWC.

Generalmente la transformación de energía de este tipo de turbinas de impulso, usa un álabes de media luna, mostrado en la siguiente figura:

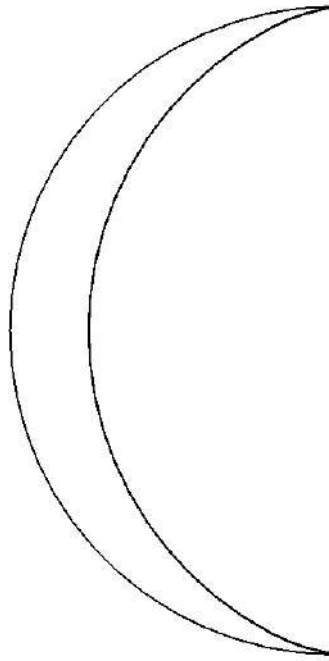


Figura 13: Perfil Media Luna para Turbina de Impulso

Como se observa, para el aprovechamiento energético de la turbina, es necesario un alineador de flujo, dando lugar al proceso de transformación de energía, que es diferente a la Turbina Wells, por el diseño del álabe y de esta manera se aprovecha la energía cinética del fluido. Considerando el alineador, para cada rotor, y a su vez, que son 2 rotores, la configuración quedaría de la siguiente manera:

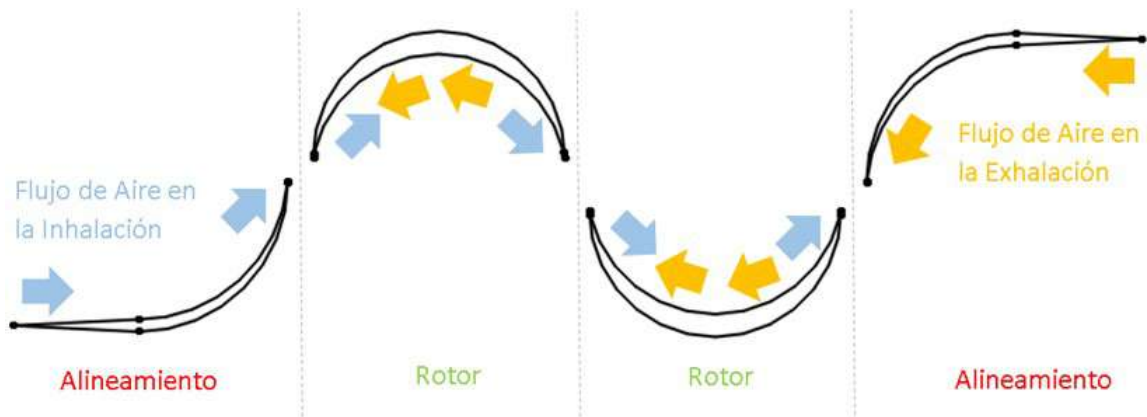


Figura 14: Comportamiento bidireccional del flujo de trabajo

En la imagen anterior se observa el comportamiento de los flujos de aire, quien depende de su comportamiento dentro de la cámara, que a su vez, va a depender de la variación de altura de la columna de agua, donde se considerara una variación de presión, quien dará función a la velocidad de descarga del aire a la atmósfera, y a su vez, la velocidad de carga del aire a la cámara. A esta variación de flujo, le llamaremos **Exhalación**, para la descarga del fluido de trabajo, e **Inhalación**, para la carga de aire a la cámara. Esta **Exhalación** e **Inhalación** proporcionará una variación de dirección del flujo másico, y por consiguiente, una variación en la producción de energía por estas condiciones. Se puede observar también las direcciones que toma el flujo a través de los alineadores y los rotores.

Para este proceso de generación de energía, a partir de la configuración de los alineadores y el perfil de media luna, se considerará su posición de giro, contrario uno del otro, analizando la potencia proporcionada a partir del triángulo de velocidades de la turbina, donde se deben considerar los siguientes parámetros iniciales:

- Parámetros iniciales del aire:

$$\rho_a = 1,225 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.1)$$

$$\nu = 1,74 \times 10^{-5} \quad (6.2)$$

$$Re = 2,6 \times 10^6 \quad (6.3)$$

- Parámetros dimensionales del orificio de descarga:

$$D_1 = 2,6m \quad (6.4)$$

$$D_2 = 1,5m \quad (6.5)$$

Considerando los parámetros mencionados anteriormente, se debe obtener una velocidad promedio del fluido de trabajo, donde se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$c_{m1} = \frac{Rev}{D_1 \rho} = 14,2 \frac{m}{s} \quad (6.6)$$

Para el análisis aerodinámico de la turbina, se aplica a partir del cálculo de los triángulos de velocidades, donde primeramente se debe considerar las siguientes condiciones, que permiten su cálculo, a una máxima eficiencia, mostradas a continuación.

$$b_1 = b_2 = b \quad (6.7)$$

$$c_{m2} = c_2 \quad (6.8)$$

Con este valor y las consideraciones a máxima eficiencia del análisis para una turbina axial, se calcula el triángulo de velocidades para esta configuración, considerando el ángulo de dirección del fluido de trabajo, el ángulo de salida y entrada para el perfil de alabe, las ecuaciones usadas para el cálculo de las velocidades relativas y absolutas, así como el ángulo α son las siguientes:

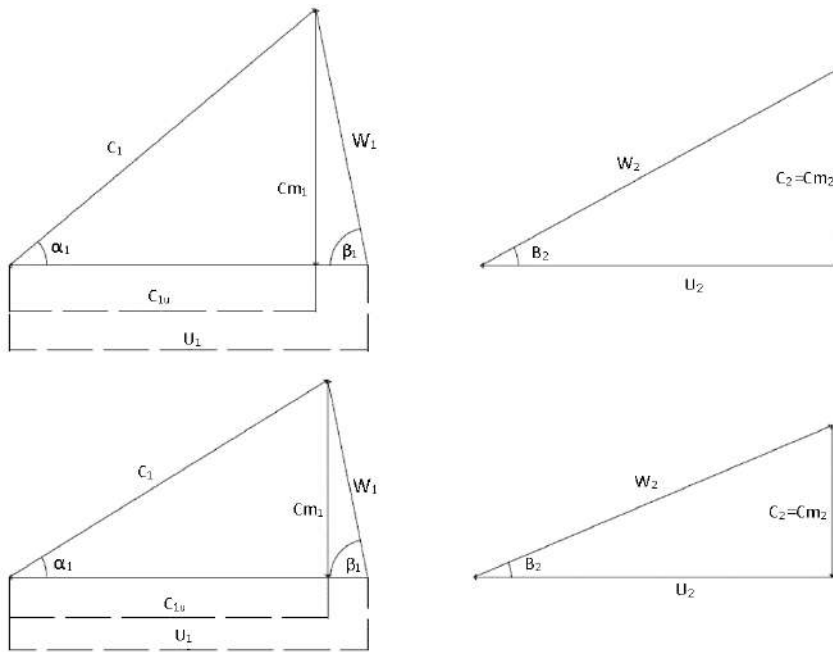


Figura 15: Triángulo de velocidades de entrada y salida respectivamente

A partir de este análisis numérico de la aerodinámica del dispositivo, se analizará la potencia útil de la turbina de impulso, donde se considera el triángulo de velocidades y las condiciones iniciales del fluido, por lo que a continuación se expresan las ecuaciones.

$$H = \frac{U c_{1m}}{g} \quad (6.9)$$

$$P_U = E Q r \rho \quad (6.10)$$

Con esta solución al análisis de las variantes de la turbina de impulso propuesta, se obtienen los valores, donde se conocerá la energía promedio generada por la turbina.

A continuación, se muestra los parámetros del diseño de la turbina, para el álabe y el alineamiento de flujo, considerando su nomenclatura correspondiente a cada dimensión:

En esta figura, se observan los parámetros de diseño del perfil de media luna, donde se considerara dos circunferencias, la distancia del centro una de otra y el ángulo de ataque, la longitud del álabe estara dada por el grosor del rotor. el perfil del alineamiento, muestra las variantes como la longitud de la entrada del fluido y el ángulo de salida del fluido.

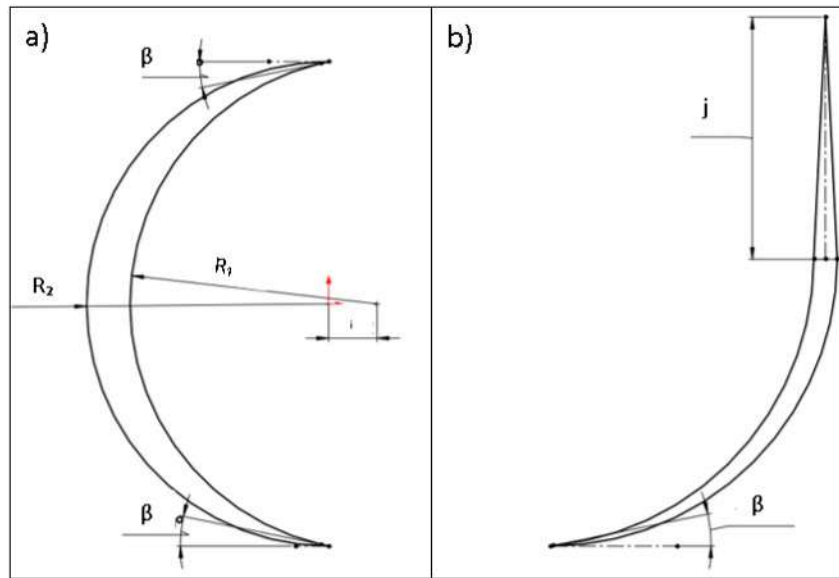


Figura 16: Parámetros de diseño del a) Perfil de media luna y b) alineador del flujo

En la siguiente figura, se puede observar las variantes del rotor, donde se observa el diámetro externo, el diámetro interno y el ancho del mismo.

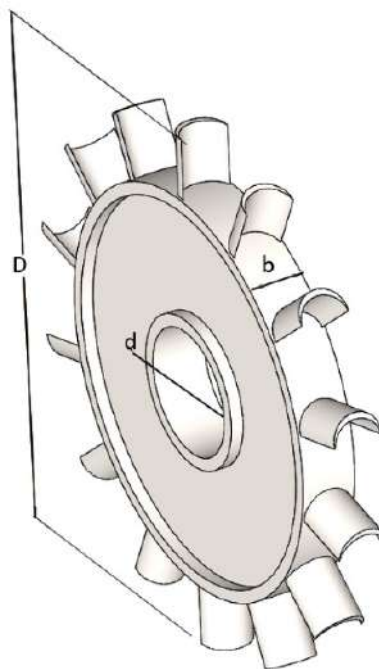


Figura 17: Rotor de la Turbina de Impulso

En las figuras anteriores se observa, la configuración del rotor de la Turbina de Impulso, donde se encuentra el perfil de media luna y las dimensiones que se deben considerar para el cálculo de la potencia. Cabe destacar que se muestra el diseño del rotor, por lo que a continuación se aprecia la Turbina de impulso, con sus respectivos alineamientos de cada rotor.

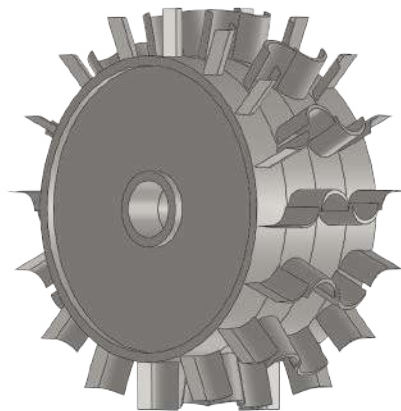


Figura 18: Bi-Turbina de Impulso

7. Resultados del análisis aerodinámico

Para este capítulo siguiente, se muestra los resultados obtenidos en el cálculo de la potencia útil de la Turbina de Impulso, donde se presenta un incremento considerable a comparación de la Turbina tipo Wells acoplada en el dispositivo OWC llamado LIMPET, todo el cálculo se realizó a partir del análisis numérico con las consideraciones a las que fue diseñado el dispositivo mencionado, donde se aplica el cálculo de los valores promedios, para establecer la potencia del sistema.

Para la parte de los análisis numéricos del cálculo de las potencias de las turbinas, se considera que el primer rotor, es quien tiene contacto directo con la entrada del flujo de aire en la OWC, por lo que se debe presentar con mayores productos en comparación del segundo rotor.

Con las consideraciones vistas en el Capítulo anterior, las ecuaciones mostradas, el cálculo de los triángulos de velocidades para una turbina axial y los parámetros de los resultados del análisis aerodinámico de la turbina de impulso serían los siguientes:

- Para la parte de los triángulos de velocidades, los valores calculados que los componen quedan de la siguiente forma:

Velocidad	Valor 1ra.	Valor 2da.	Unidades
U	92.3	92.3	$\frac{m}{s}$
C_{1m}	14.2	10.4	$\frac{m}{s}$
C_{1u}	70.7	89.3	$\frac{m}{s}$
W_1	28.4	12	$\frac{m}{s}$
C_1	72.1	89.9	$\frac{m}{s}$
α	30	30	-
β	6.5	5.9	-

Cuadro 4: Triángulo de entrada de Primera y Segunda Turbina de Impulso

Como se observa en la tabla de los triángulos de velocidades a entrada de cada turbina, los valores cambian al la entrada de la segunda turbina, por la consideración que detrás de la primera se encuentra la segunda turbina, y a su vez, esta aprovecha la energía restante a la salida de la primera. cabe destacar que en el caso de las dos, como se menciono anteriormente, los ángulos de los alineamientos de flujo y del perfil del álabe, tienen el mismo angulo de ataque para evitar variaciones en el flujo del fluido de trabajo dentro del dispositivo.

Velocidad	Valor 1ra.	Valor 2da.	Unidades
U	92.3	92.3	$\frac{m}{s}$
C_{2m}	10.4	7.6	$\frac{m}{s}$
W_2	95.9	95.6	$\frac{m}{s}$
C_2	10.3	7.6	$\frac{m}{s}$
α	30	30	-
β	6.5	5.9	-

Cuadro 5: Triángulo de salida de Primera y Segunda Turbina de Impulso

En la parte de los triángulos de velocidades a la salida de las turbinas, se aprecia el mismo comportamiento con los de entrada, también existe una disminución de velocidades de la primera a la segunda.

Con estas velocidades, las potencias que se presentan en la OWC, acoplando este tipo de turbinas, crean un incremento razonable, y considerando una doble turbina por cada orificio de descarga, como se presenta en este trabajo, se puede obtener un mejor aprovechamiento e incremento en la PTO de la OWC. Estas potencias calculadas para este dispositivo son las siguientes:

Unidad	Valor 1ra.	Valor 2da.	Unidades
PTO	339.5692	218.3553	KW

Cuadro 6: Potencia de salida de Primera y Segunda Turbina de Impulso

Como se observa, existen variaciones de potencias del primer rotor por la mayor cantidad de energía a la entrada del sistema proporcionada por el aire, dando lugar a un 55% más de PTO en comparación del segundo rotor.

Analizando los valores anteriores, se puede observar que existe poco más del doble de potencia de una Turbina de Impulso en comparación de una Turbina tipo Wells considerando las variables a las que se encuentra sometido un dispositivo LIMPET.

Un punto importante del análisis de este trabajo, son las velocidades que se presentan por el aire en el paso del orificio de descarga, y a su vez, en los alineamientos y el rotor de la Turbina, para esto, se presenta a continuación una simulación del movimiento del álabe en diferentes puntos junto con los alineamientos, mostrando así los vórtices y flujo másico

dentro del dispositivo.

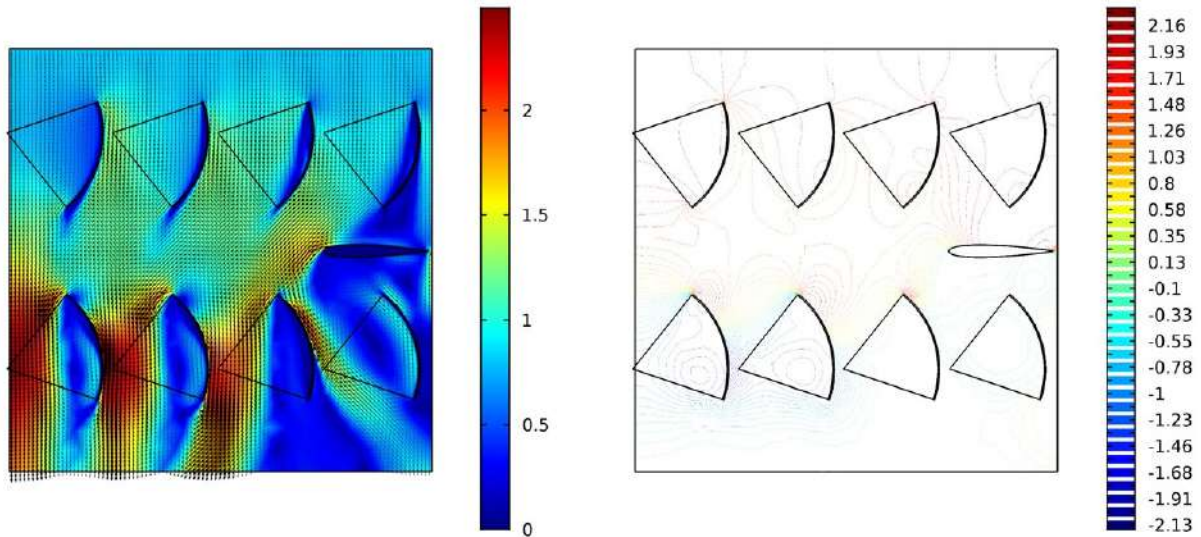


Figura 19: Simulación del movimiento de los alabes (a)

En la Figura se observa el punto inicial del estudio, el álabe presenta las velocidades de su entorno donde se aprecia el choque del flujo másico tanto al perfil como a los alineamientos, al igual que la manifestación de la presión ejercida al área de contacto, proporcionando así la energía para el avance rotacional del elemento de estudio, este análisis muestra las fuerzas ejercidas a uno solo para analizar las afectaciones y/o aprovechamientos de la energía cinética proporcionada en este punto.

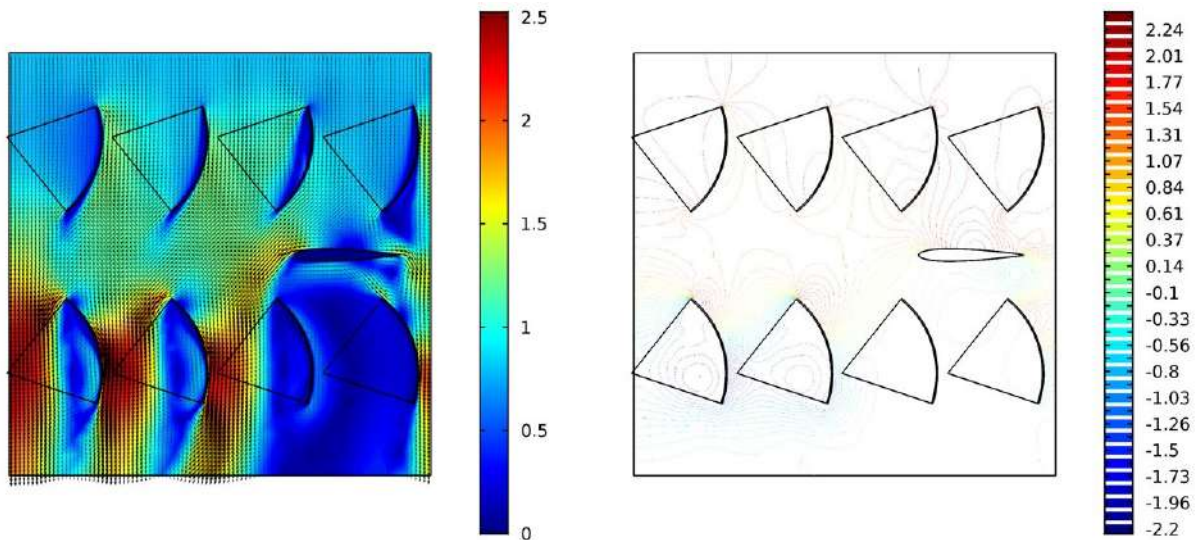


Figura 20: Simulación del movimiento de los alabes (b)

Para el punto mostrado en la Figura, se puede observar un vórtice en la parte inferior del perfil, esta ejecución del flujo másico en el área nos proporciona un aumento en el aprovechamiento energético, los vórtices pueden dar este aumento a la generación de energía si se logran aprovechar correctamente, esta manifestación nos da un aumento en la PTO. Para este caso también se observa las presiones ejercidas al perfil, por lo que nos permite señalar el área que está sometida a más presión del aire.

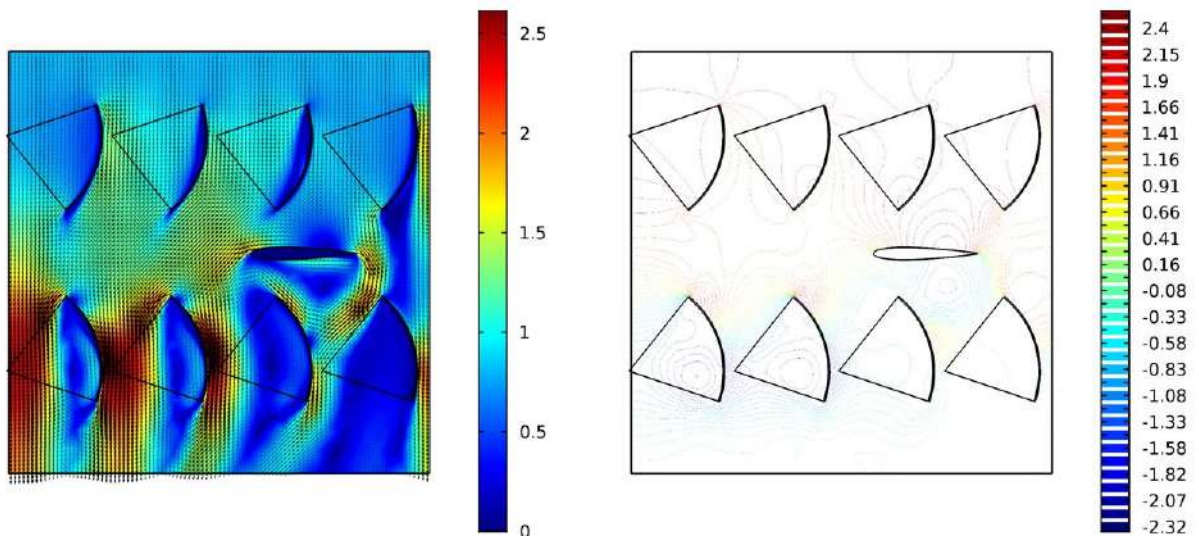


Figura 21: Simulación del movimiento de los alabes (c)

En esta Figura se presenta un vórtice, como en la anterior, que presenta una presión en el área necesaria para un aumento de velocidad rotacional del rotor, por lo que en sumatoria con el esfuerzo aplicado en la parte superior del perfil, se genera una mejor oportunidad de aumento en PTO.

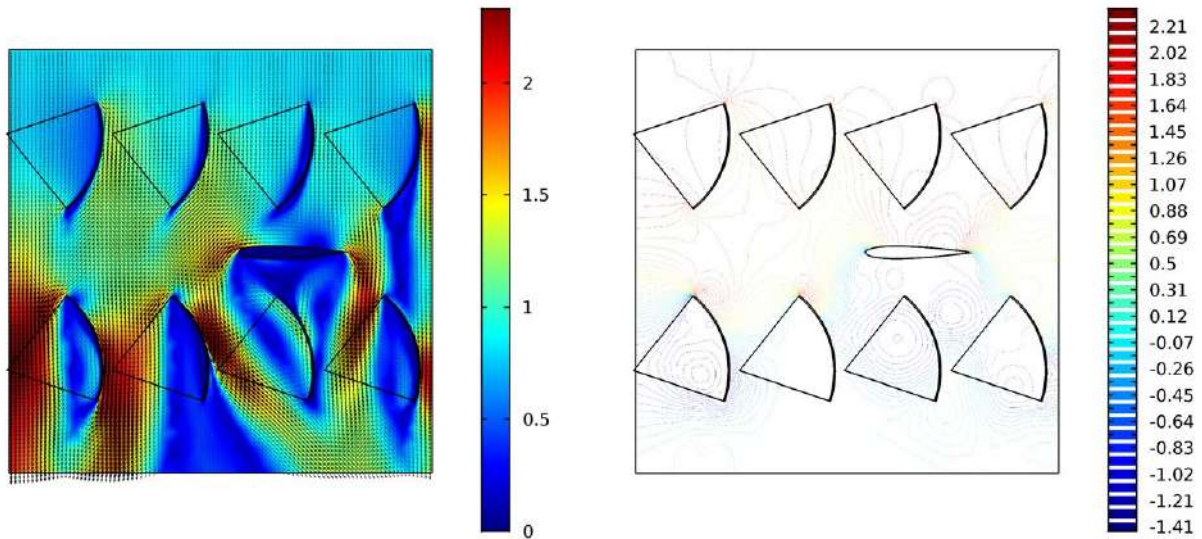


Figura 22: Simulación del movimiento de los alabes (d)

En el caso mostrado por la Figura anterior, se observa un vórtice que en viceversa al visto anteriormente, puede presentar un frenado en el giro del rotor, por lo que para este punto se menciona que pueden existir tanto aprovechamientos como restricción por la transformación de energía.

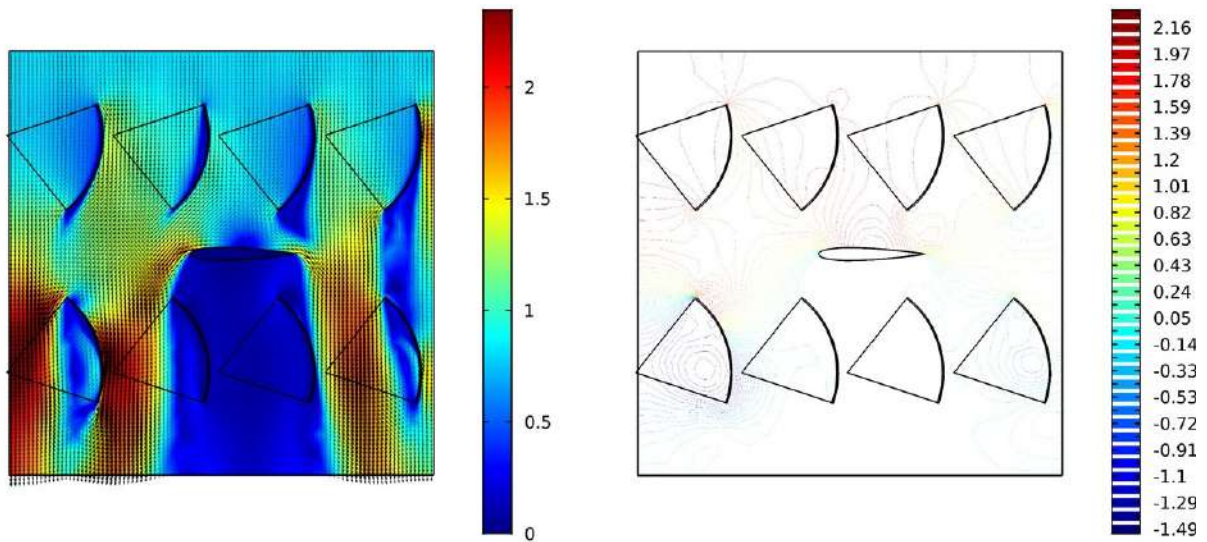


Figura 23: Simulación del movimiento de los alabes (e)

Para este caso, solo se presenta un esfuerzo aplicado a la parte superior del perfil del álabes, el cual se consideraría como un flujo normal por la inexistencia de vórtices.

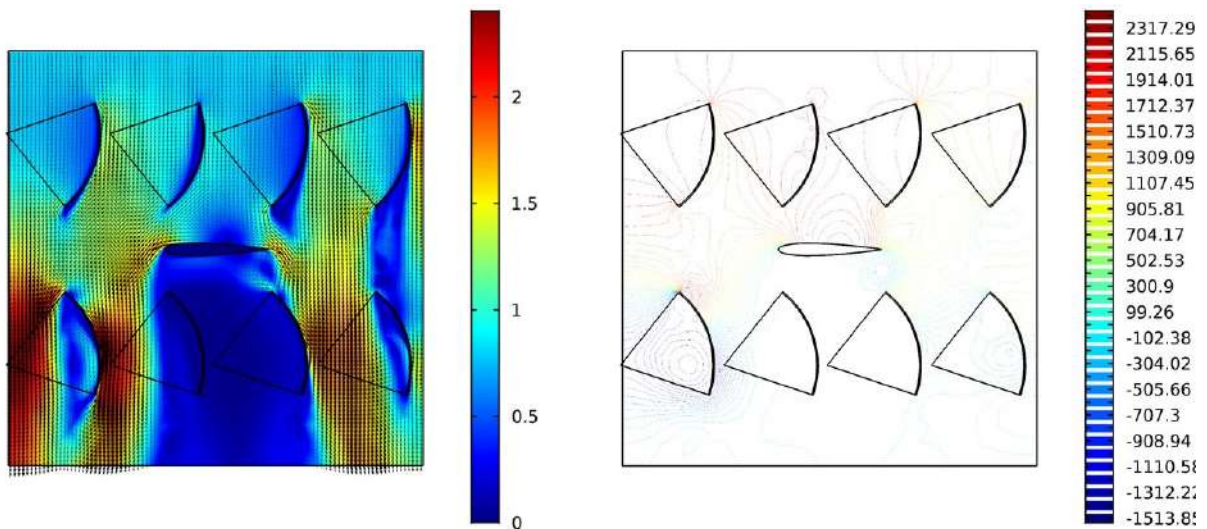


Figura 24: Simulación del movimiento de los alabes (f)

En el caso de la Figura presentada anteriormente, se observa que existe un vórtice, que desde el punto de vista del esfuerzo aplicado y el flujo que se presenta, es la mejor expresión presentada, ya que se podría considerar una mejor aplicación para un aumento de PTO.

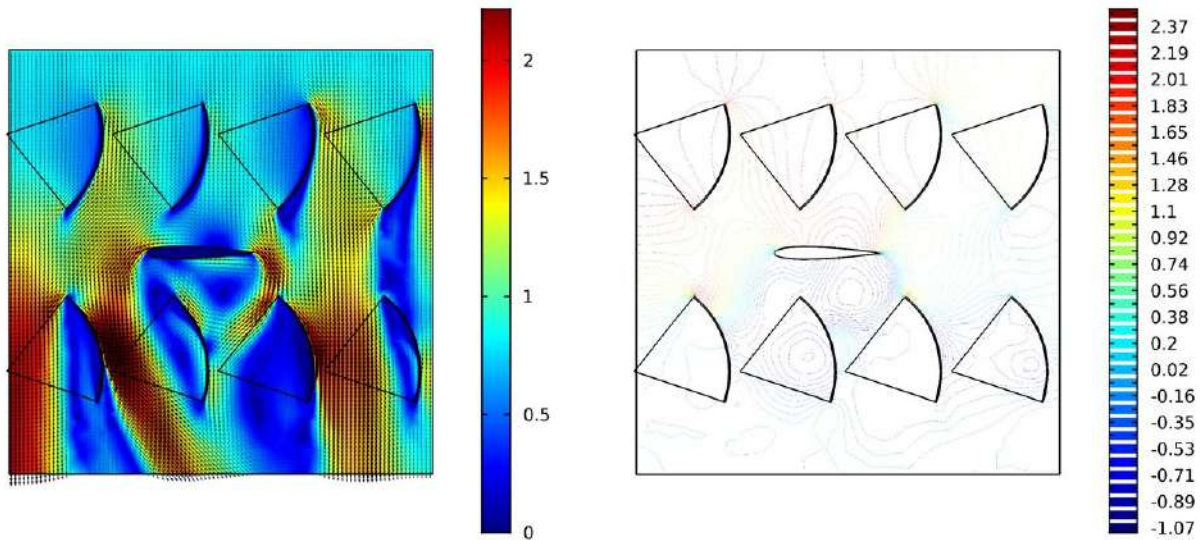


Figura 25: Simulación del movimiento de los alabes (h)

En el estudio mostrado en la Figura anterior, se observa un vórtice con las mismas características que los anteriores, el cual podría presentar un aumento de PTO en el sistema, por lo que se presenta un mayor empuje al álabe del rotor, pero existe un esfuerzo significativo en la punta delantera del álabe, por lo que se consideraría un frenado.

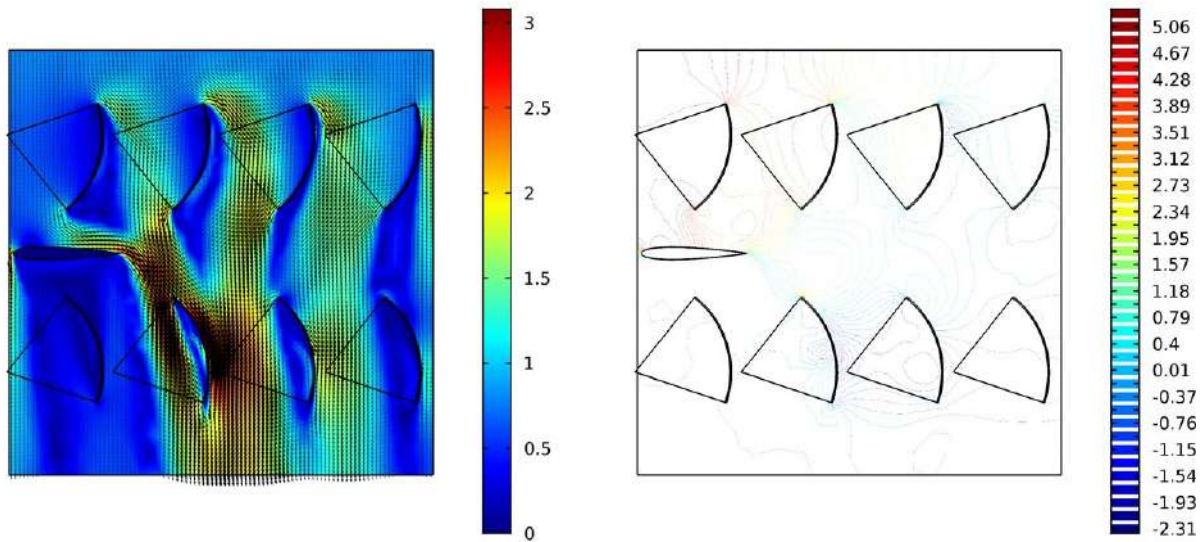


Figura 26: Simulación del movimiento de los alabes (i)

Para el último punto, se observa que el álabe presentado al final del estudio, donde no se muestra información a destacar, presenta un empuje en la parte superior del álabe, dejando

un análisis solo en esa parte donde se presentaría un esfuerzo aplicado al rotor.

Como se observó, en la mayoría de los casos presentados por las simulaciones aplicadas mediante la plataforma **Comsol Multiphysics**, muestra la mayoría de posibles aprovechamientos por los vórtices con la configuración del perfil mostrado, proporcionando la posibilidad de un aumento de PTO en estos dispositivos mostrados.

8. Conclusión

En este trabajo se realizó un análisis aerodinámico, considerando las dimensiones que cuenta el dispositivo LIMPET y a las condiciones que se encuentra sometido por el oleaje de Azores Portugal, al observar los resultados obtenidos del considerable aumento de potencia al doble, es una opción viable por el aumento que presenta, por lo que al considerarse para su aplicación en las costas de México, con la configuración presentada, se puede obtener una generación de energía eléctrica para su uso en la comunidad, tanto por el bajo costo de mantenimiento como el bajo costo por cada KWh.

Una parte fundamental de la producción de energía de este sistema es el aumento del 123% más en comparación de las Turbinas tipo Wells por parte de la configuración presentada.

Esta producción de energía puede contribuir a la disminución en el uso de energías convencionales alrededor del país, gracias a su potencial, se podría generar un valor importante en el uso de las energías olas.

9. Bibliografía

- [1] A. Babarit, J. Hals, M. Muliawan, A. Kurniawan, T. Moan, & J. Krokstad. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renew. Energ.*, 41:44–63, 2012.
- [2] A. Buenrostro. Eficiencia energética, un estudio de caso: Islas Marías informe final. Instituto Nacional de Ecología, 2007.
- [3] A. Clement, P. McCullen, A. F. d O. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, M.-T. Pontes, P. Schild, B.-O. Sjostrom, H. Sorensen, & T. Thorpe. Wave energy in europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6:405–431, 2002.
- [4] A. E. Fredriksen. Tapered channel wave power plants. In *Energy for Rural and Island Communities IV*, pages 179–182, 1985.
- [5] A. F. d O. Falcão. The shoreline owc wave power plant at the azores. In *4th European Wave Energy Conference*, pages 42–47, 2000.
- [6] A. F. d O. Falcão. Wave energy utilization: review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:899–918, 2010.
- [7] A. Iturrioz, R. Guanche, J. Armesto, M. Alves, C. Vidal, & I. Losada. Time domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a floating multi-chamber device. *Ocean Eng.*, 76:65–74, 2014.
- [8] A. Mora, E. Bautista, & F. M´endez. Influence of a tapered and slender wave collector on the increment of the efficiency of an oscillating water column wave energy converter. *Ocean Eng*, 129:20–36, 2017.
- [9] Almuzakki, M. Z., Barradas-Berglind, J. J., Wei, Y., Muñoz-Arias, M., Vakis, A. I., & Jayawardhana, B. (2018). A port-Hamiltonian Approach to Cummins’ Equation for Floater Arrays with Linear Power-Take Off Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(3), 155–160.
- [10] C. B. T. Heath, T.J.T. Whittaker. The design, construction and operation of the limpet wave energy converter (islay, scotland). In *4th European Wave Energy Conference*, pages 49–55. Energy Centre Denmark, 2000.
- [11] Chang, C. Y., Chou, F. N. F., Chen, Y. Y., Hsieh, Y. C., & Chang, C. T. (2016). Analytical and experimental investigation of hydrodynamic performance and chamber optimization of oscillating water column system. *Energy*, 113, 597–614.
- [12] D. R. B. Kraemer, C. O. G. Ohl, & M. E. McCormick. Comparison of experimental and theoretical result of the motions of a mccaube wave pump. In *4th EWEC*, 2000.

- [13] D. Ross. *Power from sea waves*, volume 1. Oxford University Press, 1995.
- [14] Elhanafi, A., & Kim, C. J. (2018). Experimental and numerical investigation on wave height and power take-off damping effects on the hydrodynamic performance of an offshore-stationary OWC wave energy converter. *Renewable Energy*, 125, 518–528.
- [15] F. He, Z. Huang, and A. W. Law. An experimental study of a floating breakwater with asymmetric pneumatic chambers for wave energy extraction. *Applied Energy*, 106:222–231, 2013.
- [16] Gaspar, J. F., Calvário, M., Kamarlouei, M., & Soares, C. G. (2018). Design tradeoffs of an oil-hydraulic power take-off for wave energy converters. *Renewable Energy*, 129, 245–259.
- [17] H. C. Soerensen, R. Hasen, E. Friis-Madsen, W. Panhauser, G. Mackie, P. Frigaard, T. Hald, W. Knapp, J. Keller, E. Holmén, B. Holmes, & G. Tho. The wave dragon now ready for test in real sea. In 4th EWEC, 2000.
- [18] Halder, P., Rhee, S. H., & Samad, A. (2017). Numerical optimization of wells turbine for wave energy extraction. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(1), 11–24.
- [19] Iino, M., Miyazaki, T., Segawa, H., & Iida, M. (2016). Effect of inclination on oscillation characteristics of an oscillating water column wave energy converter. *Ocean Engineering*, 116, 226–235.
- [20] J. Cruz. *Ocean Wave Energy*, volume 1. Springer, 2008.
- [21] John Ashlin, S., Sundar, V., & Sannasiraj, S. A. (2016). Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristics. *Renewable Energy*, 96, 341–353.
- [22] K. Bonke and N. Ambli. Prototype wave power stations in Norway. In *Proceedings of International Symposium on Utilization of Ocean Waves Wave to Energy Conversion*, pages 34–45, 1986.
- [23] K. Budal, J. Falnes, L. C. Iversen, P. Lillebekken, G. Oltedal, T. Hals, & T. Onshus. The Norwegian wave-power buoy project. In *The Second International Symposium on Wave Energy Utilization*, pages 323–344, 1982.
- [24] K. Nielsen. *Ocean energy conversion in Europe: recent advancements and prospects*, volume 1. Centre for renewable energy sources, 2006.
- [25] K. S. del Prado G., G. Negrete, & J. Gabriel. *Diagnostico participativo en la colonia penal federal islas Marías. hacia la conservación y el manejo sustentable del territorio*. Instituto Nacional de Ecología, 2006.

- [26] Liu, C. (2016). A tunable resonant oscillating water column wave energy converter. *Ocean Engineering*, 116, 82–89.
- [27] M. McCormick. *Ocean Wave Energy Conversion*. Dover Publications, 2007.
- [28] M. Rahman. *Water waves: Relating modern theory to advanced engineering applications*. Clarendon Press, 1995.
- [29] M. Stiassnie, E. Naheer, & I. Boguslavsky. Energy losses due to vortex shedding from the lower edge of a vertical plate attacked by surface wave. 1984.
- [30] Medina-López, E., Bergillos, R. J., Moñino, A., Clavero, M., & Ortega-Sánchez, M. (2017). Effects of seabed morphology on oscillating water column wave energy converters. *Energy*, 135, 659–673.
- [31] Nielsen, K. M., Pedersen, T. S., Andersen, P., & Ambühl, S. (2017). Optimizing Control of Wave Energy Converter with Losses and Fatigue in Power Take off. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14680–14685.
- [32] P. Kundu & I. Cohen. *Fluid Mechanics*. Academic Press, 2008. 4th Edition.
- [33] R. Henderson. Design, simulation and testing of novel hydraulic power take-off system for the pelamis wave energy converter. *Renewable energy*, 31(2):271–283, 2006.
- [34] Rezanejad, K., Bhattacharjee, J., & Guedes Soares, C. (2015). Analytical and numerical study of dual-chamber oscillating water columns on stepped bottom. *Renewable Energy*, 75, 272–282.
- [35] Rodríguez, C. A., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2018). Assessment of the power conversion of wave energy converters based on experimental tests. *Energy Conversion and Management*, 173(68), 692–703.
- [36] Rubel, R. I., Uddin, K., & Islam, Z. (2016). Comparison of Aerodynamics Characteristics of NACA 0015 NACA 4415, (October), 1–10.
- [37] S. H. Salter. Wave power. *Nature*, 249:720–724, 1974.
- [38] Setoguchi, T., Santhakumar, S., Takao, M., Kim, T. H., & Kaneko, K. (2003). A modified Wells turbine for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 28(1), 79–91.
- [39] Takao, M., & Setoguchi, T. (2012). Air turbines for wave energy conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012.
- [40] T. Vinje. An approach to the non-linear solution of the oscillating water column.
- [41] T. Whittaker & T. Stewart. An experimental study of nearshore and shoreline oscillating water columns with harbours. In *European Wave Energy Symposium*, pages 151–157, 1993.

- [42] Vyzikas, T., Deshoulières, S., Barton, M., Giroux, O., Greaves, D., & Simmonds, D. (2017). Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices. *Renewable Energy*, 104, 248–258.
- [43] W. Cummins. The impulse response function and ship motions. *Schiffstechnik*, 9:101–109, 1962.
- [44] Xiao, X., Xiao, L., & Peng, T. (2017). Comparative study on power capture performance of oscillating-body wave energy converters with three novel power take-off systems. *Renewable Energy*, 103, 94–105.
- [45] Y. Delauré & A. Lewis. 3d hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by boundary element methods. *Ocean Eng.*, 30:309–330, 2003.
- [46] Y. Masuda & M. E. McCormick. Experiences in pneumatic wave energy conversion in japan. In *Utilization of Ocean Waves-Wave to Energy Conversion*, pages 1–13. ASCE, 1987.
- [47] Zhang, X., Yang, J., Xiao, L., Daewoo, S., Marine, E., ExxonMobil, . . . et al. (2014). Numerical study of an oscillating wave energy converter with nonlinear snap-through Power-Take-Off systems in regular waves. 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE 2014 Busan, 3, 522–527.
- [48] Zhang, X., & Yang, J. (2015). Power capture performance of an oscillating-body WEC with nonlinear snap through PTO systems in irregular waves. *Applied Ocean Research*, 52, 261–273.
- [49] Zhao, X., & Ning, D. (2018). Experimental investigation of breakwater-type WEC composed of both stationary and floating pontoons. *Energy*, 155, 226–233.
- [50] Zheng, S., & Zhang, Y. (2018). Theoretical modelling of a new hybrid wave energy converter in regular waves. *Renewable Energy*, 128, 125–141.