

Centro de Enseñanza Técnica y Superior

Con reconocimiento de validez oficial de estudios del Gobierno del Estado de Baja California según Acuerdo de fecha 10 de octubre de 1983



Re-diseño mecánico de aspas en turbinas tipo Wells

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta:

Adrián Montes Cabrera

Director y Asesor:

Dra. Dalia Holanda Chávez García

Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad)

Co-Director

Mto. Abiud Flores Valentín

Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad)

Ensenada, Baja California, México
2019

Re-diseño mecánico de aspas en turbinas tipo Wells
Tesis/Proyecto de aplicación que para obtener el grado de Maestro en
Ingeniería e Innovación

Presenta:

Adrián Montes Cabrera

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Dalia Holanda Chávez García
Directora de Tesis

Dr. Gerardo Hirata Salazar
Sinodal

Mta. Lucia Beltrán Rocha
Sinodal

Mta. Amanda Georgina Nieto Sánchez
Coordinador del Posgrado en Ingeniería e Innovación

Adrián Montes Cabrera © 2019

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Adrián Montes Cabrera** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería e Innovación

Re-diseño mecánico de aspas en turbinas tipo Wells

Resumen aprobado por:

Dra. Dalia Holanda Chávez García

El método de columnas oscilantes de agua (OWC, por sus siglas en inglés) se utiliza para convertir energía undimotriz (energía producida por las olas) en energía eléctrica. Entre los prototipos existentes para la conversión energética destacan el sistema LIMPET 500. Este sistema genera electricidad derivada de corrientes de aire generadas por la oscilación del mar que transitan por el ducto de un generador, donde se encuentra la turbina tipo Wells, que se encarga de transformar la energía de las corrientes bi-direccionales de aire en energía mecánica y, posteriormente, en eléctrica.

La turbina tipo Wells tiene la peculiar característica de tener un giro del tipo unidireccional (giro en un solo sentido) bajo la influencia de flujos bi-direccionales; de esta forma es posible captar la energía del aire que entra y sale. Esto se debe, principalmente, a que sus alabes cuentan con perfiles geométricos; el perfil que se utiliza en el sistema LIMPET es un perfil simétrico del tipo NACA0012. El defecto presenta es que su eficiencia de arranque se limita a un rango de flujo de aire, dependiendo del perfil geométrico. Si se escoge un perfil que sea capaz de iniciar giro con flujos de aire bajos, presentará deficiencia al momento de estar en operación con flujos de nivel alto, y viceversa.

El objetivo de este proyecto fue aumentar la eficiencia de operación de las turbinas tipo Wells para la mejora de la capacidad de producción energética del método renovable de columnas oscilantes de agua. Se mejoró la eficiencia de arranque de la turbina en un 10%, gracias a un rediseño de un alabe capaz de adaptarse a diferentes niveles de flujo el cual se logra por actuadores a base de nitinol (estructura 55% níquel y 45% titanio) el cual es un material inteligente con memoria de forma que se acciona al aplicarle calor; de esta forma se aprovecha un rango mayor de flujo de aire en comparación al captado por el perfil NACA0012.

Mediante el diseño asistido por computadora, se propuso un perfil con una alteración de 10° respecto a la horizontal del alabe. También, bajo los estudios experimentales del modelo se observan cambios favorables en cambiar de un perfil NACA0012 a uno propuesto para aprovechar las corrientes de aire en una mayor proporción.

Palabras Clave: energía undimotriz, turbina Wells, perfiles NACA, columnas oscilantes de agua (OWC), alabe morfológico.

Abstract of the thesis presented by **Adrian Montes Cabrera** as a partial requirement to obtain the Masters of Science degree in Engineering and Innovation with orientation in

Mechanical re-design of a Wells turbine blade

Abstract approved by:

Dra. Dalia Holanda Chávez García

The oscillating water columns (OWC) method is a renewable energy method used to convert ocean-waves energy into electrical energy. Among all of the existing prototypes based on this method, the LIMPET 500 is one of the most important. This system used to convert the airflow produced do to the oscillation of water into electricity by rotating a Wells turbine; air flows out the chamber when the water level rises, and flows back in the chamber when the sea level drops.

Wells turbines have the unique quality of having a unidirectional rotation under the effect of a bi-directional airflow. This is mainly possible due to its blade geometrical profile; the Wells turbine in the LIMPET 500 uses a NACA0012 profile, which is a symmetrical airfoil profile. The disadvantage of this type of profile is that is limited to a specific operational airflow range, with a low rotational-start efficiency. If the turbine uses a profile to start rotation at low airflow speeds, it will not be capable of handling high-speed airflows, and vice versa.

The objective of this project was to improve the operational efficiency of a Wells turbine in order to improve the efficiency of the OWC renewable energy generation method. The rotational-start efficiency was improved 10% due to a mechanical re-design; the blade improvement consisted of a mechanism capable of making a deflection of 10° on the horizontal (chord) actuated by nitinol wires. Improving the NACA0012 profile blade with this new design made the turbine capable of withstanding rotation under low-speed airflows without stalling.

This project was possible due to the use of computer-aided design (CAD) and computer-aided engineering (CAE) softwares; the flow simulations made in the software made it possible to achieve an outstanding design for the NACA0012 profile, which excelled in performance.

Keywords: wave energy, Wells turbine, NACA profile, oscillating water columns (OWC).

Dedicatoria

El presente proyecto de investigación está dedicado a:

A mi familia, que se ha preocupado por siempre darme lo mejor y han sido el motor de motivación para seguir adelante en todo momento de mi vida.

A mi directora de proyecto, la Dra. Dalia H. Chávez García, quien siempre mostró la mayor disposición para ayudarme, siempre transmitió una actitud positiva para poder concluir con el trabajo, y nunca dejó de creer en mí.

Al Mto. Abiud Flores Valentín, por su constante apoyo a lo largo de mi vida, como estudiante y profesionista, para cumplir mis metas de manera satisfactoria, y en quien he encontrado una mano amiga.

A Ana G. Jerez García, por su cariño incondicional y constante apoyo para ver los problemas con la mejor cara posible y poder solucionarlos.

A mis amistades que me han apoyado y me han motivado a ser la mejor versión de mí día con día.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al Centro de Enseñanza Técnica y Superior, por brindarme la oportunidad de seguir preparándome para mi vida profesional. También, por el apoyo que recibí por parte de su personal para poder lograr el objetivo de completar un nivel de estudios de posgrado.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por darme la oportunidad de contar con el apoyo de una beca para cumplir el objetivo de seguir desarrollando nuevos conocimientos para mi persona y nuestra sociedad.

Agradezco a mi familia, pareja, y amigos por su constante apoyo a lo largo de esta etapa que concluye con el resultado del escrito aquí presente. Sin ustedes no hubiera sido posible.

Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	vi
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.3 Preguntas de investigación.....	2
1.4 Justificación.....	2
1.5 Propuesta de Trabajo.....	3
1.6 Objetivo General.....	3
1.6.1 Objetivos Específicos.....	3
1.7 Hipótesis.....	3
Capítulo 2. Marco Teórico.....	4
2.1 Energías Renovables.....	4
2.2 Historia del concepto de energías renovables.....	5
2.2.1 Primer Revolución Industrial.....	6
2.2.2 Segunda Revolución Industrial.....	6
2.2.3 Tercera Revolución Industrial.....	7
2.3 Aplicación práctica de las energías renovables.....	9
2.3.1 Energía solar.....	9
2.3.2 Energía Eólica.....	10
2.3.2.1 Componentes del aerogenerador.....	10
2.3.3 Energía hidráulica o hídrica.....	12
2.4 Método de columnas oscilantes de agua (OWC).....	13
2.5 Sistema LIMPET 500.....	14
2.5.1 Cámara de captura.....	15
2.5.2 Turbina.....	16
2.5.3 Sistema de control.....	17
2.5.4 Eficiencia del sistema.....	18
2.6 ¿Qué es una turbina Wells?.....	19
Capítulo 3. Metodología.....	20
3.1. Etapa I: Diseño.....	20
3.1.1. Diseño Asistido por Computadora.....	21
3.1.1.1. Modelado 3D.....	21
3.1.1.2. Análisis de fluidos asistido por computadora.....	21
3.1.1.3. Análisis de elementos finitos asistido por computadora.....	22
3.1.2. Diseño Analítico.....	23
3.1.2.1. Análisis mecánico de la estructura del alabe.....	23
3.2. Etapa II: Prototipos.....	24
3.2.1. Impresión 3D.....	24
3.2.2. Maquinado: fresa y torno.....	26
3.2.3. Módulo de medición.....	26

3.2.4. Componentes de miscelánea	27
3.2.5. Materiales y componentes.....	27
3.3. Etapa III: Pruebas físicas	29
3.4. Cronograma	30
Capítulo 4. Resultados	31
4.1. Modelado 3D.....	31
4.2. Análisis de fluidos asistido por computadora	34
4.3. Ensamble de modelo de turbina	36
4.4. Resultado de mediciones de pruebas físicas.....	38
Capítulo 5. Conclusiones	43
5.1. Conclusión General	43
5.2. Conclusión de Hipótesis	44
5.3. Trabajo a futuro.....	44
Lista de referencias bibliográficas	45

Lista de figuras

Figura 1. Generación energética de energías renovables a nivel mundial en 2016. (IRENA, 2019)	4
Figura 2. Azul. Comportamiento de los niveles de CO ₂ en la atmosfera a lo largo de los años. Gris. Comportamiento de la temperatura a lo largo de los años. Área circulada. Periodo 1de las guerras mundiales. [Recuperado de: http://www.co2levels.org/].....	7
Figura 3. Colector solar para calentar agua de uso personal. [Recuperado de: https://solar-energia.net/energia-solar-termica]	9
Figura 4. Representación de generación eléctrica por método fotovoltaico. [Recuperado de: http://www.areatecnologia.com/energia-solar-fotovoltaica.htm]	10
Figura 5. Representación de una aero-turbina y sus partes. [Recuperado de: http://eoliccat.net/la-tecnologia/principios-de-la-energia-eolica/como-funciona-un-aerogenerador/?lang=es]	11
Figura 6. Distribución general del agua. [Recuperado de: SEMARNAT/CONAGUA, 2011]	12
Figura 7. Representación de planta hidroeléctrica. [Recuperado de: http://energyeducation.ca/encyclopedia/Hydroelectric_facility].....	12
Figura 8. Secciones del proceso de generación de energía por columnas oscilantes de agua. [Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Oscillating-water-column-OWC-source-24_fig4_259744972].....	13
Figura 9. Representación del proceso OWC para generación de energía eléctrica; sistema LIMPET 500. [Recuperado de: https://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Oscillating+Water+Column].....	15
Figura 10. División de la cámara de captura en 3 secciones. [Recuperada de: https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf].....	15
Figura 11. Representación 2D del perfil NACA 12 utilizado para turbina Wells en sistema LIMPET 500. [Recuperado de: http://airfoiltools.com/plotter/index]	16
Figura 12. Turbina Wells utilizada en el sistema LIMPET 500. [Recuperada de: https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf].....	16
Figura 13. Representación 3D de turbina Wells. [Recuperado de: http://offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2650823]	19
Figura 14. Perfil geométrico del aspa de una turbina tipo Wells; perfil simétrico respecto al eje horizontal. [Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Aerodynamic-forces-acting-on-a-blade-of-a-Wells-turbine-rotor_fig2_284435214].....	19
Figura 15. Diagrama de esfuerzos cortantes en un cuerpo de secciones de pared delgada (Ugural, 1984).....	23
Figura 16. Perfil de coordenadas para el perfil geométrico NACA0012.	32
Figura 17. Perfil de coordenadas para el perfil geométrico propuesto, NACA0012/10°.....	32

Figura 18. Modelado CAD del alabe con perfil NACA0012.	33
Figura 19. Modelado CAD del alabe con perfil NACA0012/10°.....	33
Figura 20. Ensamble del cuerpo de turbina con álabes NACA0012/10°.....	34
Figura 21. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012, con flujo de 5 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.	34
Figura 22. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012, con flujo de 3 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.	35
Figura 23. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012/10°, con flujo de 5 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.....	35
Figura 24. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012/10°, con flujo de 3 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.....	36
Figura 25. Sub-ensamble del cuerpo de la turbina junto con álabes.....	37
Figura 26. Ensamble físico de cuerpo de turbina con el soporte de la turbina.	37
Figura 27. Ensamble de estructura de túnel de viento para simular corrientes de aire en turbina.....	38
Figura 28. Turbina Wells 1:6.667 instalada en el túnel de viento para medición de parámetros.....	38
Figura 29. Gráficos del comportamiento de arranque de turbina. En azul se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para iniciar giro del perfil NACA0012. En rojo se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para iniciar giro del perfil NACA0012/10°.....	40
Figura 30. Gráficos del comportamiento de frenado de turbina. En azul se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para frenar giro del perfil NACA0012. En rojo se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para frenar giro del perfil NACA0012/10°.....	42

Lista de tablas

Tabla 1. Precios del crudo durante la crisis energética de los años 70. [Recuperado de: https://bit.ly/2GeZbg3]	8
Tabla 2. Países que conforman el Protocolo de Kioto. [Recuperado de: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf]	8
Tabla 3. Parámetros geométricos de la cámara de captura. [Recuperado de: https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf]	16
Tabla 4. Parámetros de diseño de turbina para sistema LIMPET 500. [Recuperado de: https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf]	17
Tabla 5. Parámetros de diseño de generador del sistema LIMPET 500. [Recuperado de: https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf]	17
Tabla 6. Comparación de eficiencias esperadas vs. eficiencias obtenidas del sistema LIMPET 500. [Recuperada de: https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf]	18
Tabla 7. Propiedades físicas del 'Onyx'. Recuperado de: [https://support.markforged.com/hc/en-us/articles/209934486-Onyx]	25
Tabla 8. Componentes para modelo a escala del LIMPET 500.	27
Tabla 9. Componentes de sistema de monitoreo para medición de datos.	29
Tabla 10. Cronograma de actividades.	30
Tabla 11. Parámetros de diseño para el cuerpo y álabes de la turbina original (100%) y modelo (15%).	31
Tabla 12. Mediciones de velocidades de flujo de aire para iniciar arranque de turbina. Pruebas en perfil NACA0012 y NACA0012/10°.	39
Tabla 13. Velocidades promedio de las corridas de cada perfil, y la eficiencia de arranque respecto al perfil NACA0012.	40
Tabla 14. Mediciones de velocidades de flujo de aire para detener giro de turbina. Pruebas en perfil NACA0012 y NACA0012/10°.	41
Tabla 15. Velocidades promedio de frenado de las corridas de cada perfil, y eficiencia de aprovechamiento de flujo respecto al perfil NACA0012.	42

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

En el mundo actual existe gran preocupación por el cuidado del medio ambiente, pues se ha detectado un crecimiento exponencial en los niveles de contaminación, valores cuyo incremento se fue produciendo desde los años de la revolución industrial. El uso desmedido de combustibles fósiles ha ido deteriorando continuamente diferentes áreas importantes del planeta, como lo son: aguas de los mares contaminadas por los derrames de dichos combustibles y sus derivados, como el incidente de la compañía British Petroleum en el Golfo de México, en el 2010, donde se derramaron 4.9 millones de barriles de crudo (Reuter, 2012); los altos índices de CO₂ en las grandes metrópolis, causante de aplicar medidas de contingencia ambientales, por ejemplo en Ciudad de México; el deterioro de la capa de ozono debido a los niveles irregulares de gases en las capas que cubren al planeta; entre muchos otros (Contreras et al, 2013). Por ello, diferentes científicos, organizaciones y gobiernos han trabajado en la implementación de las energías renovables: energía eólica, energía solar, energía hidráulica, etc. (Çakmak e İsbir, 2015).

El problema con dichos tipos de generación alterna de energía es la baja eficiencia de producción de los procesos utilizados. Aun no se logra aprovechar al máximo toda aquella capacidad de producción de energía. En este caso, se hará énfasis en la producción de energía por medio de columnas oscilantes de agua ("Oscillating-Water-Columns", OWC, por sus siglas en inglés), derivado de la energía undimotriz (olas).

La generación de energía renovable por medio del método OWC, es un método que estuvo bajo estudio por mucho tiempo, pero que recientemente se está implementando su uso en ciertos lugares del mundo que cuentan con características de oleaje alto: Reino Unido, Irlanda, China, España, entre otras. A pesar de que este método presenta niveles de producción de energía altos, no se está aprovechando su potencial al máximo; los procesos y mecanismos utilizados aun presentan bastantes áreas de oportunidad (Moñino et. al., 2018). Particularmente para el método OWC, se necesita incursionar más en uno de sus componentes más importantes: las turbinas.

Actualmente se utilizan dos tipos de turbinas: turbinas de impulso y turbinas tipo Wells (Kumar et al, 2017). Ambas tienen la peculiaridad de tener rotación solamente en una dirección al estar sometidas a las fuerzas generadas por columnas de aire bi-direccionales. Cada una presenta sus ventajas y desventajas: la primera presenta un arranque más rápido para un rango de flujos más amplio y su manera de operar es una de las más silenciosas, pero sus picos de eficiencia operacional son bajos; por otra parte, las turbinas tipo Wells presentan un nivel alto de eficiencia operacional (en comparación con las turbinas de impulso), su costo de operación es bajo, y presenta una mejor adaptación a estados altos de rotación, pero su eficiencia de arranque es muy baja (Cui y Hyun, 2016).

El problema de las turbinas Wells, en cuanto a baja eficiencia de arranque se refiere – eficiencia que hace referencia a que el nivel de flujo en el que puede iniciar a operar es muy alto; necesita altos flujos de aire para iniciar su rotación– se debe principalmente al perfil geométrico que presenta en sus aspas (Takasaki et al, 2014). De no buscar mejoras para la solución de este problema, la eficiencia de operación no podría aumentar y, por consiguiente, no se estaría aprovechando al máximo la energía proporcionada por el movimiento oscilatorio del mar. De aquí se desprende la problemática inicial: la necesidad de mejorar la eficiencia de arranque de las turbinas tipo Wells para aumentar su eficiencia de operación y producción.

1.2 Planteamiento del Problema

La generación de energía renovable por medio del método de oscilación de columnas de agua (OWC, por sus siglas en inglés), el cual utiliza turbinas Wells, tiene un buen nivel de producción de energía, pero podría ser mayor. Esto se debe a que no se está extrayendo la máxima cantidad de energía posible debido a la baja eficiencia de arranque que tienen las turbinas Wells; su eficiencia está rondando entre un 0.4 y 0.7. Se ha propuesto utilizar otro tipo de turbinas, como las turbinas de impulso, pero sus picos de eficiencia son menores que los obtenidos con las turbinas Wells (Kim, Setoguchi et al, 2001). También, indican que de los principales problemas que se han encontrado es que el perfil geométrico actual sometido a bajos flujos de aire influye en gran medida en esta baja eficiencia.

Debido a esto, nace la iniciativa de diseñar un nuevo perfil geométrico que sea capaz de mejorar la eficiencia de arranque de las turbinas Wells en bajos flujos de aire, sin alterar la eficiencia que se tiene en altos flujos de aire.

1.3 Preguntas de investigación

¿Cómo se genera energía por el método OWC?

¿Qué es una turbina tipo Wells y cómo funciona?

¿Existen propuestas de mejora para el funcionamiento de las turbinas Wells?

¿Qué perfiles geométricos son los que harían más eficiente el arranque de giro de la turbina?

¿Se verá afectada la eficiencia de giro en estado estable al alterar el perfil geométrico para mejorar la eficiencia de arranque?

¿Qué beneficios traería mejorar la eficiencia de las turbinas Wells?

1.4 Justificación

En vías de ver por un mejor futuro para la humanidad y el planeta, es necesario incursionar más en nuevos métodos de generación energética renovable, y mejorar aquellos existentes que tienen potencial de establecerse como los principales generadores de energía. Actualmente, el método OWC es uno de los que ha presentado

esas cualidades de crecer y clasificarse como una de las maneras importantes de producción de energía renovable (Moñino et. al., 2018).

En investigaciones realizadas anteriormente por diferentes autores, se ha encontrado que modificar el perfil geométrico de las aspas de las turbinas Wells aumenta la eficiencia de funcionamiento. Cui y Hyun (2016) determinaron, por medio de experimentos con flujo en estado estable continuo, que un cambio en la geometría de las aspas daba como resultado un aumento del 9% más que el de una turbina con aspas en su diseño original.

Por ello, encontrar y presentar una mejora que pueda aumentar la eficiencia de arranque de las turbinas Wells, traería como consecuencia grandes beneficios en la producción energética del método OWC; entre los beneficios más importantes se encuentra la optimización de su capacidad energética. Lograr que el método funcione en un nivel bajo de oscilación de agua (bajo flujo de aire), podría hacer que se implementara en una mayor cantidad de costas, no solo en aquellas que presentan un índice alto en oleaje. Y, por lo tanto, se verían beneficiados una mayor cantidad de lugares alrededor del mundo, reduciendo niveles de contaminación y aumentando la producción energética.

1.5 Propuesta de Trabajo

Diseñar y armar un prototipo con el que se pueda comprobar la mejora en la eficiencia de arranque de una turbina tipo Wells entre el perfil geométrico propuesto y perfil geométrico original.

1.6 Objetivo General

Aumentar la eficiencia de operación de las turbinas tipo Wells para la mejora de capacidad de producción energética del método renovable OWC.

1.6.1 Objetivos Específicos

1. Mejorar en un 3% la eficiencia de arranque por medio del re-diseño de aspas.
2. Proponer por lo menos un modelo nuevo de aspas.
3. Comparar las eficiencias de una turbina actual con la(s) propuesta(s) por medio de la simulación en software CAE, y prototipos físicos.

1.7 Hipótesis

Re-diseñar el perfil geométrico de las aspas de las turbinas Wells, mediante la alteración de la cola en 10° respecto a la horizontal, aumenta la eficiencia de arranque del método OWC.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Energías Renovables

Las energías renovables se definen como el tipo de energías que son producto de fuentes naturales que son capaces de renovarse rápidamente, haciendo que el consumo o explotación de la materia prima no se vea afectada y que no cause impactos ambientales irreversibles en los ecosistemas. Las fuentes principales de las que se extrae dicha energía son fuentes tan grandes que se tornan inagotables, como lo son: el sol, el agua (mares, ríos, lagos), el viento, y la materia vegetal, principalmente. (Merino L.)

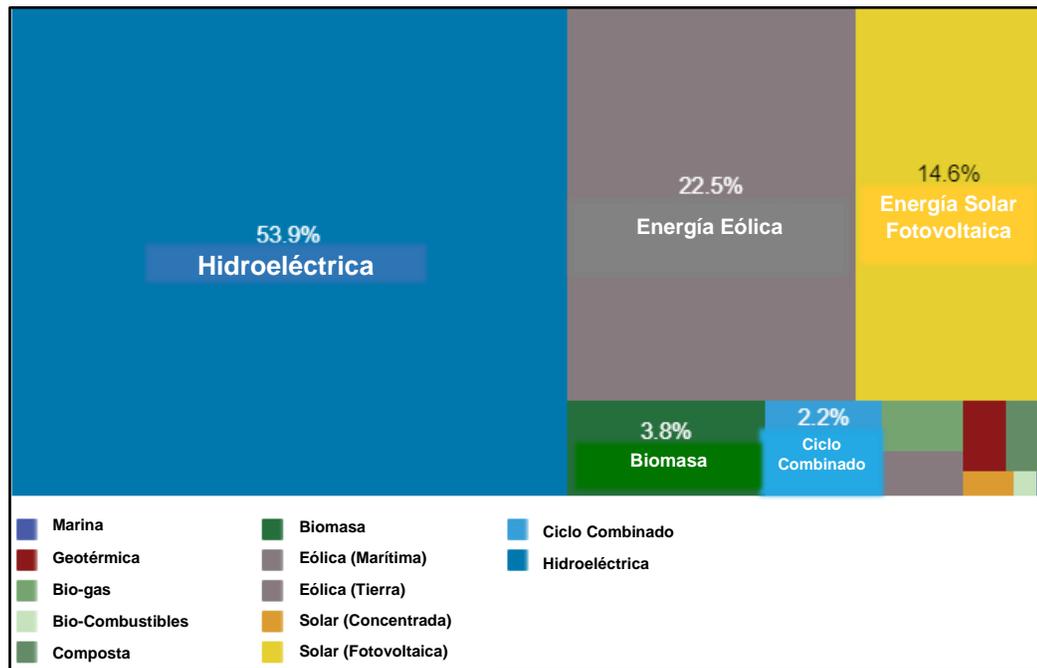


Figura 1. Generación energética de energías renovables a nivel mundial en 2016. (IRENA, 2019)

El sol es la fuente de energía más importante con la que el planeta Tierra cuenta. Su energía se produce de la radiación de las reacciones químicas y físicas en su núcleo, en un proceso conocido como fusión nuclear. La energía se transmite en el espacio en forma de radiación, y es aprovechada por los organismos vivos en la Tierra. El resto de la energía se regresa al espacio, al rebotar en la superficie del planeta. Para poder generar energía a partir de este recurso, comúnmente se utilizan celdas solares, cuyos paneles son de silicio; este material convierte la radiación en energía por medio de un efecto fotovoltaico. Es importante mencionar que otra parte de la radiación se concentra en la evaporación del agua, con lo que se generan los ciclos del agua.

A nivel mundial, el recurso más explotado en las tecnologías de generación renovable, y del que se produce mayor cantidad de energía es la extraída del agua. Las plantas

hidroeléctricas son el principal aportador de energía a nivel mundial, con una producción del 53.9% en 2016, según el último registro actualizado de la IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables) (IRENA, 2018). La extracción de energía del agua se aprovecha de diferentes maneras, ya sea aprovechando los caudales de los ríos, la fuerza de las olas de los océanos, o por ciclo Rankine. Recuperar energía del movimiento de las corrientes de agua es un método que se utiliza desde la antigüedad, donde se instalaban grandes rotores con aspas para generar energía mecánica; principalmente se utilizaba para la molienda de granos. Otra fuente de energía que se utilizaba para accionar molinos era el aire.

El uso de la energía eólica, o la energía derivada de las corrientes de aire se ha utilizado desde tiempo atrás para diferentes funciones particulares, como: impulsar barcos de vela, accionar molinos de grano, o para bombeo de agua. Actualmente, el aire se utiliza principalmente para la generación de energía eléctrica. Para este método, el proceso utilizado para la conversión de energía cinética del aire a energía eléctrica se realiza por medio de turbinas eólicas. La manera de funcionar de este mecanismo es aprovechar el flujo másico del aire y convertirlo a energía mecánica por medio de aspas; estas se encargan de generar movimiento de rotación a una flecha conectada a la turbina, donde la energía mecánica se transforma a eléctrica.

Por otra parte, el método de generación de energía por medio de la materia orgánica, 5% de las energías renovables, es obtener energía por medio de los procesos químicos que se llevan a cabo en los ciclos de vida de los organismos vivos. Generalmente, el proceso que más se aprovecha en este tipo de método es la descomposición de la materia, donde las reacciones químicas que se llevan a cabo crean energía suficiente para que se pueda cosechar y ser utilizada como energía eléctrica. Una práctica muy común es el de la creación de compostas para extraer gases, o la conversión de aceites vegetales para la creación de bio-diesel.

Para entender mejor los diferentes procesos, es importante primero entender a qué se refiere el concepto de 'energías renovables'.

2.2 Historia del concepto de energías renovables

Hablar de energías renovables es hablar de una práctica que se ha llevado a cabo desde tiempos remotos; hacer uso de los recursos naturales (agua, viento, y sol) es como el ser humano inició principalmente a sustituir la fuerza humana por la fuerza de la naturaleza y, así, multiplicar la productividad de las actividades que realizaban. Las principales muestras de esta práctica que se dan es el uso del fuego, donde se comienza a utilizar como método de calefacción dentro de cuevas en tiempos de frío, o para la cocción de comidas. El transporte marítimo cambia su método de impulso por medio de remos y comienza a aprovechar las corrientes del viento como su fuente principal para generar el movimiento de las embarcaciones. Las corrientes de ríos se comienzan a utilizar como fuente de propulsión para los molinos y de esta manera dejar atrás la molienda a mano. (Schallenberg J. et al, 2008)

2.2.1 Primer Revolución Industrial

Todas estas prácticas, y muchas otras, se comienzan a perder con la invención de la primera máquina de vapor (con la introducción del carbón como combustible), la cual daría inicio a la primer Revolución Industrial (mediados del siglo XVIII), y cambiaría por completo el mundo que se conocía hasta ese momento. Se comenzarían a abandonar los trabajos artesanales, convirtiéndose en procesos industriales; las bancas y empresarios jugarían un papel importante en el flujo monetario y la inversión para la industrialización de diversos procesos (producción de textiles, evolución de técnicas de agricultura, mecanización de producción de metales, etc.). El crecimiento poblacional se comienza a disparar a un ritmo acelerado gracias a la mejora de calidad de vida; hay un mayor abastecimiento de alimentos, mejores vestimentas, y se comienza a incursionar en químicos que darían inicio a los fármacos. (Burgaleta R. et al, 2010)

Estos cambios provocaron, a su vez, impactos que alterarían de manera negativa la vida cotidiana de la clase obrera. Debido al crecimiento acelerado de población, surgieron las grandes metrópolis, y con ellas la necesidad de producir mayor cantidad de bienes; se comenzó a dar un movimiento poblacional gigantesco en el que la gente buscaba adaptarse a la nueva era industrial, pero donde muchos perdían sus trabajos, y otros se sentían perjudicados por trabajar maquinaria que no les pertenecía (principalmente los agricultores). Al mismo tiempo que la población crecía desmedidamente, las minas de carbón se comenzaban a explotar de la misma forma, todo para obtener la materia prima que mantenía funcionando toda maquinaria existente: el carbón. Es en este periodo que se comienzan a ir elevando los índices de contaminación ambiental, pero donde aún no se tenía un conocimiento al respecto, y no era un aumento alarmante.

2.2.2 Segunda Revolución Industrial

A mediados del siglo XIX, las altas demandas de productos y los avances tecnológicos que se generaron dieron pie a que desatara la segunda Revolución Industrial. Con ella llegó la introducción de nuevos combustibles y maneras de generar energía para las máquinas: combustibles fósiles y la electricidad. Los intereses por ciertas industrias, como la textil, disminuyeron y se le comenzó a dar más importancia a la industria químico-farmacéutica. La combinación de las nuevas máquinas junto con las nuevas fuentes energéticas y el crecimiento acelerado de la población dieron entrada a que los índices de CO₂ se comenzaran a disparar de manera exponencial creciente (Figura 1).

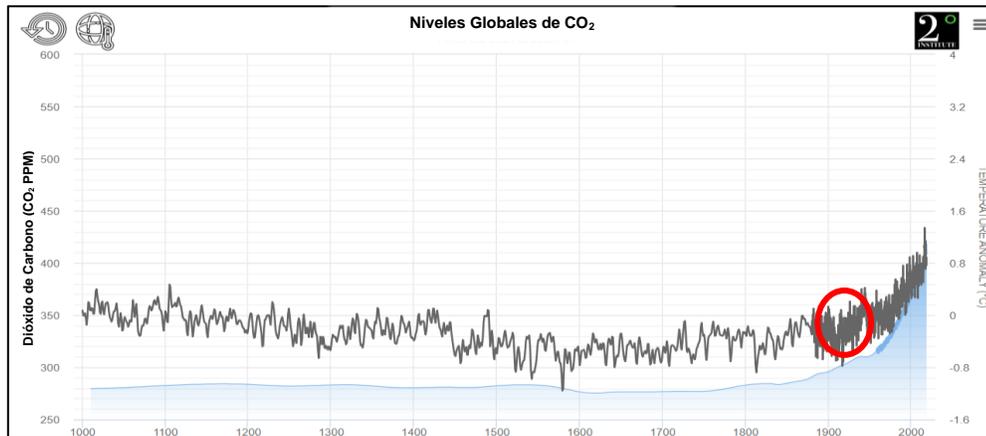


Figura 2. Azul. Comportamiento de los niveles de CO₂ en la atmosfera a lo largo de los años. Gris. Comportamiento de la temperatura a lo largo de los años. Área circulada. Periodo de las guerras mundiales. [Recuperado de: <http://www.co2levels.org/>]

Ya transcurridos los años, la segunda etapa de la Revolución Industrial llegó a su fin. Posteriormente se comenzaría una etapa de tragedia global con los acontecimientos bélicos de mayor impacto hasta hoy vividos por la humanidad: la primer y segunda guerra mundial. En esos tiempos las industrias tendrían un fin único, la producción masiva de armamentos los cuales iban desde armas de fuego hasta transportes militares (aéreos, marítimos, y terrestres); a pesar de que se logró crear incalculable cantidad de inventos y avances tecnológicos, la mentalidad de producción industrial estaba fijada en un aspecto: la guerra. Y por ello, los niveles de CO₂ no se vieron alterados de gran medida como venía ocurriendo años atrás. Es importante rescatar de esta época la invención de un componente que cambiaría por completo los medios de transporte aéreos y que jugarían un papel de suma importancia para la generación de electricidad: las turbinas. (Burgaleta R. et al, 2010) (Roel V., 1998)

2.2.3 Tercera Revolución Industrial

Terminadas las guerras, las cosas volvieron a la senda que venían tomando: crecimiento poblacional exponencial desmedido, innovación en nuevas tecnologías, búsqueda de cimientos de combustibles fósiles, entre otras cuestiones de menor peso. Las ganas de tener las mejores tecnologías por parte de las grandes potencias dieron inicio a lo que sería la tercer Revolución Industrial (entre los años de 1950 y 1970). Durante esta época se vio nacer innumerable cantidad de inventos, prototipos e ideas de las cuales muchas quedaron a papel y lápiz a causa de lo ambiciosas que eran; la tecnología de aquellos tiempos aun no permitía que se pudieran crear todos los inventos deseados. Algo que no se veía venir era una crisis energética que prendería las alarmas: el conflicto entre Estados Unidos e Irak en los setentas, dispararía los precios del crudo. (Roel V.)

Tabla 1. Precios del crudo durante la crisis energética de los años 70. [Recuperado de: <https://bit.ly/2GeZbg3>]

1973	US\$ 5,8 el barril
1974	US\$ 12,8 el barril
1978	US\$ 13,1 el barril
1979	US\$ 27,4 el barril
1980	US\$ 35,2 el barril

Una vez superada la crisis energética, se comienza nuevamente con la sobre-explotación de recursos naturales; un nuevo problema se detecta, y se encienden nuevamente las alarmas. Se comienzan a notar cambios climatológicos en diferentes regiones del mundo: las lluvias comienzan a ser de una composición química acida, los casquetes polares comienzan a disminuir, se notan aumentos en los promedios de las temperaturas (aumentos de entre 0.6°C y 1.2°C), los registros de mareas son mayores. A mediados de los años 80 y 90, los científicos de las potencias mundiales muestran su preocupación y comienzan a incursionar en métodos para mejorar la calidad del ambiente. Pero sería hasta 1997 que se haría un tratado entre países para controlar las emisiones de gases invernadero, y limitar la explotación de ciertos recursos naturales; a este tratado se le conoció como: el Protocolo de Kioto. (Merino L.)

Tabla 2. Países que conforman el Protocolo de Kioto. [Recuperado de: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>]

Alemania	92
Australia	108
Austria	92
Bélgica	92
Bulgaria*	92
Canadá	94
Comunidad Europea	92
Croacia*	95
Dinamarca	92
Eslovaquia*	92
Eslovenia*	92
España	92
Estados Unidos de América	93
Estonia*	92
Federación de Rusia*	100
Finlandia	92
Francia	92
Grecia	92
Hungría*	94
Irlanda	92
Islandia	110
Italia	92
Japón	94
Letonia*	92
Liechtenstein	92
Lituania*	92
Luxemburgo	92
Mónaco	92

2.3 Aplicación práctica de las energías renovables

El concepto de energías renovables comienza a aparecer y tomar fuerza como concepto de aplicación en los años de la crisis energética de los años 1970. Se emplea como una solución a los problemas de contaminación que se comenzaron a detectar por los altos residuos en el ambiente –proceso que comenzó desde tiempos de la Revolución Industrial (1750), a la fecha. Se pretendía emplear las energías renovables como un sustituto de la generación energética por medio de combustibles fósiles, de los cuales se había demostrado generan un gran impacto a los diferentes ecosistemas: altos residuos de CO₂ que se van a la capa de ozono, agrandando el problema de efecto invernadero; contaminación de los suelos por la alta explotación de minerales; contaminación de los mares por la extracción de crudo en aguas bajas y profundas. (Dolores M., 2011)

Los científicos clasificaron tres fuentes renovables de las cuales no se explota la más mínima cantidad de energía que se podría extraer: energía solar, energía hidráulica, y energía eólica.

2.3.1 Energía solar

La energía solar no es otra más que aquella que recibe la Tierra por medio de radiación proveniente del Sol. Se estima que es la fuente más importante de todas, pues gracias a ella se generan los diferentes ciclos naturales de la Tierra (corrientes marinas, diferencias de presiones que generan vientos, temperaturas aptas para crear vida). (Madrid Solar, 2006)

Existen dos maneras de aprovechar este tipo de energía:

1. Energía solar térmica: este método consiste en utilizar la radiación del sol para calentar un fluido y producir vapor.

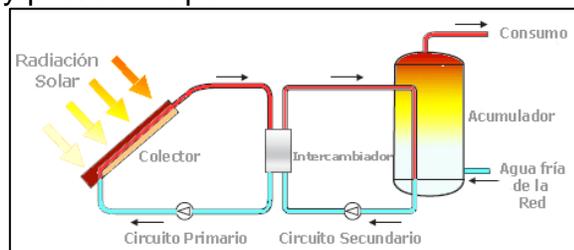


Figura 3. Colector solar para calentar agua de uso personal. [Recuperado de: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica>]

2. Energía solar fotovoltaica: este método consiste en transformar directamente la energía mediante un método fotovoltaico (células solares fabricadas de materiales semi-conductores, e.g. Silicio).

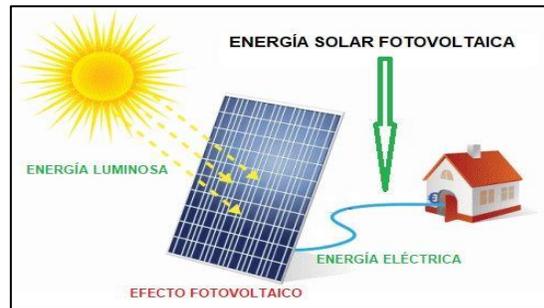


Figura 4. Representación de generación eléctrica por método fotovoltaico. [Recuperado de: <http://www.areatecnologia.com/energia-solar-fotovoltaica.htm>]

2.3.2 Energía Eólica

La producción de energía eólica es aquella donde se aprovechan las corrientes de viento, el cual se crea por las diferencias de presiones alrededor del mundo. El sol (principal fuente de vida) al calentar de manera desigual diferentes partes del mundo, se produce el movimiento de energía en forma de viento; este movimiento de energía se aprovecha por medio de: molinos, aerogeneradores, inclusive velas para el impulso de barcos. (Schallenberger J. et al, 2008)

En cuanto a producción de energía se refiere, las herramientas que acaparan el mercado eólico son las aeroturbinas, que pueden transformar la energía eólica en dos tipos diferentes (Schallenberger J. et al, 2008) (Madrid Solar, 2006):

1. Energía mecánica (*aeromotores*): comúnmente visto en la molienda de granos y bombeo de agua.
2. Energía eléctrica (*aerogeneradores*): este es el método que más impacto ha rendido frutos en el campo de aplicación desde su invención. Aprovecha el viento por medio de aspas que provocan un trabajo mecánico encargado, a su vez, de mover un generador eléctrico, cumpliendo con su función principal: generar electricidad.

2.3.2.1 Componentes del aerogenerador.

Un aerogenerador se compone inicialmente por 5 componentes importantes: rotor, torre, góndola, multiplicador, generador eléctrico. Estos son esenciales en la composición de un aerogenerador; pueden existir diferencias en las configuraciones de los elementos que componen al aerogenerador (ya sea por aspectos de legales o de diseño) (Schallenberger J. et al, 2008).

1. Rotor: es donde se transforma la energía cinética (viento en movimiento) a energía mecánica. Se produce un movimiento de rotación derivado del impulso del viento sobre las aspas (paletas).
2. Torre: su función no es otra más que dar altura al ensamble de rotor. Se entiende que, a mayor altura, las corrientes de viento son mayores, por lo tanto, se tendrá mayor probabilidad de generar energía a elevaciones altas.
3. Góndola: es la estructura que contiene en ella los elementos que se encargan de transformar la energía mecánica en eléctrica (eje del rotor al generador, multiplicador, sistemas de control y frenado, anemómetro y veleta).
4. Multiplicador: consiste en un sistema de engranes que se encargan de regular las velocidades de entrada con aquellas aptas para el funcionamiento correcto del generador. El generador necesita altas revoluciones por minuto (RPM) para su óptimo funcionamiento, por lo que la velocidad de entrada se multiplica de 20 a 60 veces para llegar a las condiciones deseadas (un aproximado es de 1500 RPM para el generador).
5. Generador eléctrico: como su nombre lo dice, es el encargado de generar electricidad; aprovecha la energía mecánica sustraída del viento para luego transformarla en energía eléctrica. Y es de este elemento de donde se envía, por medio de cables, la electricidad a los bancos de batería o a las estaciones eléctricas que se encargaran de su manejo y envío.

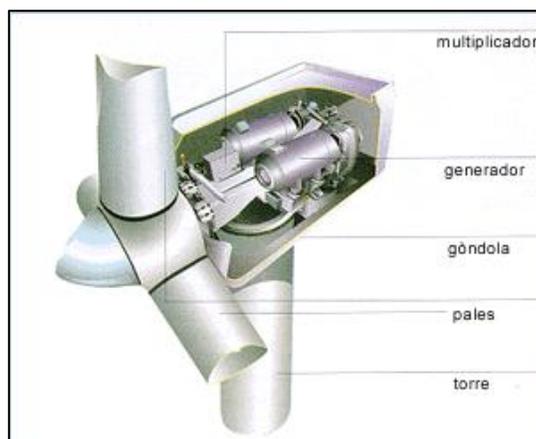


Figura 5. Representación de una aero-turbina y sus partes. [Recuperado de: <http://eoliccat.net/la-tecnologia/principios-de-la-energia-eolica/como-funciona-un-aerogenerador/?lang=es>]

2.3.3 Energía hidráulica o hídrica

Una de las fuentes de mayor presencia en el planeta es el agua, la cual cubre el 75% de la Tierra; aproximadamente se cuenta con un total de 1,386 millones de km³ de agua: 97.5% es agua salada y el 2.5% (35 millones de km³) es agua dulce (CONAGUA, 2011). Esta cantidad de km³ de agua representa una cantidad de energía muy alta: energía cinética y potencial debida a las corrientes en los océanos, los ríos, y las aguas que descienden de los lagos en las montañas.



Figura 6. Distribución general del agua. [Recuperado de: SEMARNAT/CONAGUA, 2011]

Actualmente, las represas o plantas hidráulicas instaladas en los cauces de ríos son de las únicas tecnologías con las que se cuenta para extraer energía almacenada y producir energía eléctrica; este método de producción representa el 20% de la electricidad producida a nivel mundial (UNESCO, 2017). Si este porcentaje de producción es debido a la generación hidráulica en las aguas dulces del planeta, que representan el 2.5% de agua, es viable creer que la cantidad de energía que se podría generar con el agua salada podría abastecer las necesidades de energía a nivel mundial sin ningún problema.

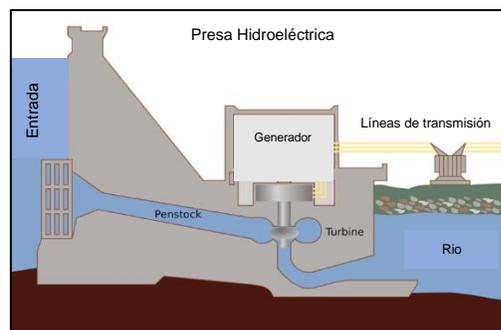


Figura 7. Representación de planta hidroeléctrica. [Recuperado de: http://energyeducation.ca/encyclopedia/Hydroelectric_facility]

Hoy en día, el agua salada se utiliza principalmente para el enfriamiento de las plantas termoeléctricas, o para el enfriamiento de reactores nucleares; también se utiliza como enfriador en diferentes rubros industriales como en la metalurgia, industria maderera, y producción de alimentos (CONAGUA, 2011). Extraer energía aprovechando los movimientos de masas de agua salada (mares y océanos) es un tema que en la actualidad está tomando forma y fuerza. Gracias a los avances tecnológicos, se han

podido hacer sistemas que sean capaces de trabajar bajo las condiciones que impone la naturaleza: sistemas con nuevos materiales capaces de aguantar altos niveles de corrosión (pinturas, aleaciones, fibras, etc.), y sistemas eléctricos que son más eficientes en la generación y almacenamiento de la energía.

2.4 Método de columnas oscilantes de agua (OWC)

Como se explicó en el tema anterior, las energías renovables forman parte importante en la generación de energía, y del cuidado del medio ambiente; por lo tanto, la importancia de seguir implementándolas y desarrollando mejoras para impulsar el sector mundial eléctrico. Un área de oportunidad con alto potencial que se observa es el de trabajar en nuevos métodos para aprovechar la energía proporcionada por los océanos; también, mejorar aquellas tecnologías y métodos ya existentes.

Actualmente (2018) existen diferentes proyectos que buscan aprovechar la energía mareomotriz (movimientos y flujos de los océanos y mares) por medio de métodos distintos; algunos proyectos han mostrado potencial para ser implementados, como: LIMPET 500 (método de columnas oscilantes de agua), Wave Dragon (método de sobreoleaje), Pelamis (método de atenuación), Powerbuoys (método de atenuación). Pero es el método OWC (“columnas oscilantes de agua”, OWC, por sus siglas en inglés) el que presenta mayor avance en lo que a energía mareomotriz se refiere. Este método comenzó a tomar interés para diferentes potencias del sector eléctrico (Australia, España, Escocia, Japón, Holanda y Alemania), por lo que han destinado ciertos montos monetarios al desarrollo e implementación de dicha tecnología, al igual que las demás expuestas.

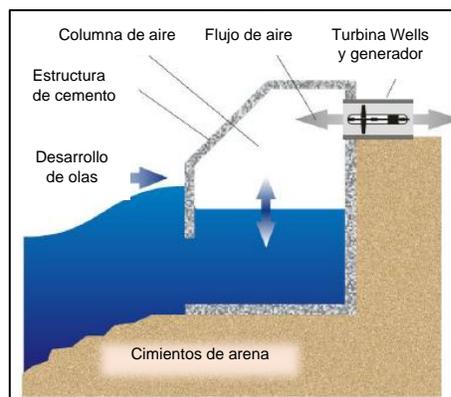


Figura 8. Secciones del proceso de generación de energía por columnas oscilantes de agua.
 [Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Oscillating-water-column-OWC-source-24_fig4_259744972]

El método OWC es un método con un principio muy básico para aprovechar el potencial que ofrece el océano. Consiste en extraer energía del mar en forma de corrientes de aire derivadas de la oscilación del mar (olas); este método emplea conocimientos técnicos y prácticos del método de generación de energía eólica, pues una vez generadas las

corrientes de aire se transforma la energía del aire en energía eléctrica por medio de los principios de funcionamiento de los generadores eólicos. Las partes en las que se divide el proceso son: oleaje de una potencia mínima de 20kW/m, cámara de compresión, turbina acoplada a generador inductivo, y sección de control y transmisión (proceso basado en sistema LIMPET 500, propuesto por la compañía irlandesa WaveGen, 1991) (Figura 6). (Webb I. et al, 2005)

La manera en la que funciona consiste en comprimir el aire contenido dentro de una cámara por medio de la oscilación del agua; la cámara cuenta con una entrada de agua en su parte inferior frontal, la cual permite la interacción del agua de mar con el aire interno de la cámara. El agua, bajo la influencia oscilatoria de la marea, actúa como un pistón dentro de la cámara que comprime el aire al subir la marea, y así provoca que éste circule por la entrada a la turbina hacia el exterior; cuando la marea baja, el agua provoca la succión de aire nuevamente a la cámara, el cual circula por la turbina, pero del exterior a la cámara. Debido a que el movimiento de la corriente de aire es del tipo bidireccional, se hace uso de una turbina tipo Wells cuya cualidad es la de tener un giro unidireccional al ser sometida a un flujo bidireccional. Parte de la energía que contenía el aire, se convierte en energía mecánica, con la cual se provoca el giro de los generadores acoplados a la turbina para la conversión a energía eléctrica; los generadores son embobinados del tipo inductivo. Por último, se cuenta con la parte de sistema de control, donde se hace el manejo adecuado de la energía eléctrica, ya sea para ser almacenada en baterías o transportada a las plantas para su manejo y distribución. (Shaaban S., 2016)

2.5 Sistema LIMPET 500

El sistema LIMPET 500 (Transformador de Energía Neumática Marina Instalado en Tierra, LIMPET, por sus siglas en inglés) es un prototipo para la conversión de energía mareomotriz a energía eléctrica utilizando el método OWC. Este sistema fue propuesto por la compañía escocesa Wavegen, en colaboración con la universidad Queen's University Belfast (QUB); su construcción inicio en 1998, en la isla de Islay, Escocia, y concluyó en el año 2000. Su capacidad de producción es de 500 kW, y se deriva de un prototipo construido en 1991 con capacidad de 75kW.

La invención de este sistema fue la base para los proyectos que se propondrían posteriormente, como lo fueron: Vizhinjam (India, 1991-2004), OSPREY2 (Escocia, 1996), Pico OWC (Portugal, 1999-date), Mutriku (España, 2011-date); todos funcionando bajo el mismo principio de OWC, solo con algunas variantes de componentes y arreglos entre ellos.

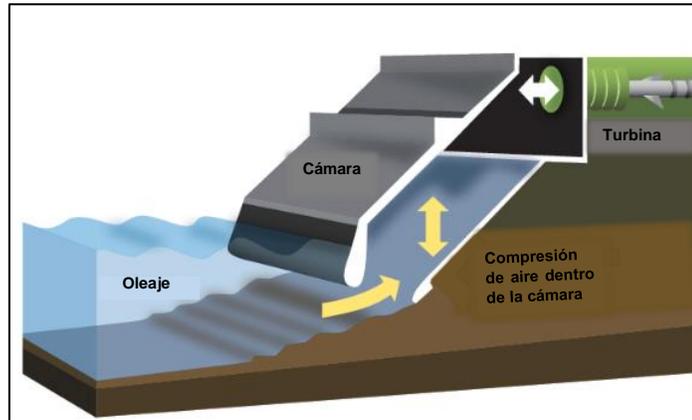


Figura 9. Representación del proceso OWC para generación de energía eléctrica; sistema LIMPET 500. [Recuperado de: <https://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Oscillating+Water+Column>]

2.5.1 Cámara de captura

La cámara de captura con la que cuenta el LIMPET 500, está fabricada por un colector con pared frontal inclinada a 40° con respecto a la horizontal que sirve para minimizar la fuerza de impacto de las olas que se producen en esa zona, aumentar el área de la columna de aire, y crea una trayectoria más amena para que el aire no entre de manera turbulenta en la turbina (esto puede generar pérdidas en la eficiencia). (Hendry J., 2007)



Figura 10. División de la cámara de captura en 3 secciones. [Recuperada de: <https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>]

La cámara está construida de concreto y acero reforzado. Tiene un frente de 21m de ancho, y se encuentra dividida en tres columnas (Figura 8), de 6m de ancho cada una, para suavizar la entrada del agua. Cuenta con un borde de 2.3m sumergido por debajo del nivel medio de agua, para mejorar la captura de agua dentro de la cámara; y tiene una altura total de 12.8m por arriba del nivel medio de agua. (Webb I. et al, 2005)

Tabla 3. Parámetros geométricos de la cámara de captura. [Recuperado de: <https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>]

Geometría	
Espesor total	21 m
No. De Cámaras + Espesor	3 x 6 m
Angulo de la Cámara	45°
Profundidad de pared bajo nivel del mar	2.3 m
Altura Total sobre nivel de mar	12.8 m

2.5.2 Turbina

El sistema utiliza dos turbinas de eje horizontal del tipo Wells, conectadas en el mismo eje; se creía que este arreglo sería el más óptimo, pero posteriormente se darían fallas en el sistema de estabilización y recuperación de energía producida. El diámetro total de cada turbina es de 2.6m, con 7 aspas de perfil NACA 12, y una cuerda en aspa de 320mm. La velocidad nominal de operación de las turbinas es de 1050rpm.

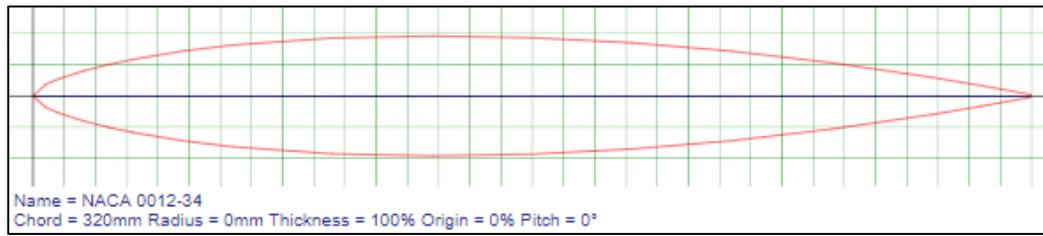


Figura 11. Representación 2D del perfil NACA 12 utilizado para turbina Wells en sistema LIMPET 500. [Recuperado de: <http://airfoiltools.com/plotter/index>]

Como sistema de control de flujo de aire, y como seguridad de paro de emergencia, se cuenta con dos válvulas tipo mariposa conectadas en serie (una en cada entrada de la turbina). Algunos de los problemas que se detectaron al hacer uso de estas válvulas fue que generaban vibraciones en la flecha al momento de abrirlas o cerrarlas. (Webb I. et al, 2005)



Figura 12. Turbina Wells utilizada en el sistema LIMPET 500. [Recuperada de: <https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>]

En el reporte emitido por *Marine Energy Challenge* (2005), se especifica que para poder tener una mejor eficiencia (n) en la turbina ($n > 40\%$) se recomienda hacer el uso de aspas a las cuales se les pueda controlar el pitch (ángulo de ataque), y de esta manera hacer más eficiente la turbina; pero a falta de tecnología no se podía implementar. (Webb I. et al, 2005)

Tabla 4. Parámetros de diseño de turbina para sistema LIMPET 500. [Recuperado de: <https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>]

Turbina	
Diámetro (Turbina)	2.6 m
Velocidad de operación nominal	1050 rpm
No. De Turbinas	2
Arreglo	En línea. Contra rotación.
Forma de Alabe	NACA 12
No. De Alabes	7
Cuerda de Alabe	320 mm
Relación de punta a masa	0.62

2.5.3 Sistema de control

Para poder controlar todo el sistema, se implementaron acciones de prevención y seguridad, principalmente. Se protegió al sistema haciendo uso de PLCs y fuente de energías ininterrumpidas (UPS, por sus siglas en ingles). La protección principal fue un solenoide que, al momento de descargarse, cerraba inmediatamente la válvula de seguridad tipo mariposa, inhibiendo el giro de las turbinas.

En cuanto a la seguridad del rotor, en caso de que las turbinas excedieran el límite de velocidad de giro nominal del generador, se instaló una protección de resistencias con las que se disipaba la energía y así controlar la velocidad de giro del rotor en altas revoluciones.

Tabla 5. Parámetros de diseño de generador del sistema LIMPET 500. [Recuperado de: <https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>].

Generador	
Tipo	F3GTS 400 G8G
Potencia en terminales de generador	2 x 250 kW
Tipo de Uso	Inversor continuo
Tipo de Rotor (en corto circuito)	Rotor Bobinado
Voltaje Nominal	400 V
Velocidad Nominal	1016 rpm
Velocidad de Prueba Máxima	1500 rpm
Inercia	Generador 11.5 kgm ² Carga 1300 kgm ²

2.5.4 Eficiencia del sistema

Para este proyecto se estimaba poder operar a un 48% de eficiencia total de sistema. La eficiencia total del sistema está constituida por: energía de las olas a energía neumática; energía neumática a energía mecánica; y, energía mecánica a energía eléctrica. Pero la realidad fue otra, pues se obtuvo una eficiencia del 8% total del sistema.

Esto se debió principalmente a detalles que fueron citándose a lo largo de las pruebas realizadas al LIMPET 500. El componente que mostro mayor cantidad de perdidas fue el generador, el cual se estimaba funcionara en un 90% de eficiencia, pero tuvo resultados del 32%. Los resultados obtenidos fueron por los lapsos de tiempo en los que el sistema estuvo operando a bajas revoluciones (muy por debajo de la velocidad característica de los generadores de 1016rpm); cuando un generador está trabajando por debajo de su velocidad característica, se crean pérdidas parásitas o perdidas por corriente de Eddy (la energía eléctrica se transforma en calor u otra forma de energía no deseada).

El segundo componente en tener una eficiencia baja fue la turbina que, de un 60% esperado, tuvo solo un 40% de eficiencia. Según los resultados obtenidos en las corridas que se hicieron, los problemas se derivaban de un flujo deficiente de aire, del cual la turbina solo podía aprovechar un máximo de 75%; este flujo deficiente fue ocasionado por la entrada del aire al conducto de la turbina, pues se generaba cierto nivel de turbulencia debido al grado de inclinación que presentaba la turbina con respecto a la cámara de aire. (Webb I. et al, 2005)

Por último, la cámara de compresión mostró la menor diferencia entre la eficiencia esperada y la obtenida; se estimaba convertir un 80% de la energía del agua a energía neumática, pero solamente se logró obtener un 64%. Se propuso hacer un rediseño de la cámara en el que el flujo del aire fuera con el menor ángulo de ataque posible con respecto a la entrada de la turbina. (QUB, 2002)

Tabla 6. Comparación de eficiencias esperadas vs. eficiencias obtenidas del sistema LIMPET 500.
[Recuperada de: <https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>]

Tipo de conversión de energía	Estructura/Dispositivo	Eficiencia % (esperada)	Eficiencia % (medición)
Ola – neumática	Columna oscilante de agua	80	64
Neumática – Mecánica	Turbina Wells	60 (Promedio)	40 (Promedio)
Mecánica – Eléctrica	Generador	100*	32
Eficiencia total		48 (Promedio)	8

2.6 ¿Qué es una turbina Wells?

Dentro del sistema LIMPET 500, y algunos otros sistemas de producción energética por medio del método OWC emplean como “motor” de giro una turbina del tipo Wells. Pero, ¿a qué se debe esto?

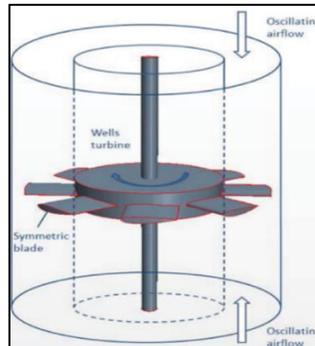


Figura 13. Representación 3D de turbina Wells. [Recuperado de: <http://offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2650823>]

El hecho de que los sistemas de método OWC utilicen este tipo de turbinas se debe a su característica particular de tener un giro unidireccional al estar sometida a un flujo bidireccional. Esto quiere decir que sin importar que el flujo que provoca el giro de rotación golpee cualquiera de las caras de las aspas de la turbina, ésta siempre tendrá rotación en un solo sentido, determinado por el perfil del asa que se proponga.

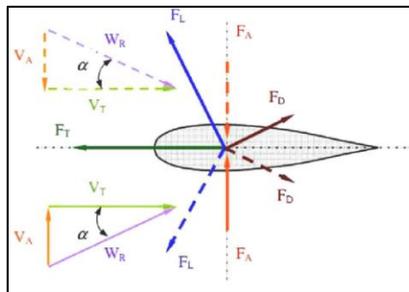


Figura 14. Perfil geométrico del asa de una turbina tipo Wells; perfil simétrico respecto al eje horizontal. [Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Aerodynamic-forces-acting-on-a-blade-of-a-Wells-turbine-rotor_fig2_284435214]

El giro de rotación unidireccional se debe al perfil simétrico (Figura 12) que presentan sus aspas. Este diseño le permite aprovechar la energía del aire y transformarla en fuerza de empuje que incide en la superficie del asa. Las fuerzas ejercidas sobre el asa se dispersan de manera simétrica, lo que hace que la turbina gire siempre en el mismo sentido.

Existen diferentes tipos de perfiles para aspas, y estos se encuentran estandarizados por el Comité de Consejo Aeronáutico Nacional (NACA, por sus siglas en inglés). (Kumar T. et al, 2017)

Capítulo 3. Metodología

El propósito del presente capítulo se centra en la explicación detallada del contenido que se desarrollará en las diferentes secciones que se tienen planeadas para efectuar la comprobación de hipótesis propuesta: *Re-diseñar el perfil geométrico de las aspas de las turbinas Wells, mediante la alteración de la cola en 10° respecto a la horizontal, aumenta la eficiencia de arranque del método OWC.*

El proceso general del proyecto se basa en una metodología del tipo experimental, con la que se busca responder a la afirmación planteada anteriormente por medio del análisis de las variables que actúan directamente sobre el proceso del sistema LIMPET 500.

Con la finalidad de llevar en forma la investigación propuesta, se presentan los pasos de la metodología que se seguirán. Se pretende organizar de la manera más óptima el tiempo total con el que se cuenta para la entrega de resultados finales. Para ello, se proponen cuatro etapas diferentes, distribuidas con diferentes tiempos debido a la necesidad que exige cada actividad a desarrollar dentro de cada etapa. Las etapas que se proponen son:

- Etapa I: Diseño
- Etapa II: Prototipos
- Etapa III: Pruebas físicas y medición

Dentro de cada una de estas etapas se verán involucradas actividades de diferente tipo, las cuales se detallan en las siguientes secciones.

3.1. Etapa I: Diseño

Como primer paso de la metodología se encuentra la etapa de diseño. Dentro de esta etapa se realizan dos tipos de actividades, las cuales son de suma importancia: diseño analítico y el diseño asistido por computadora. El objetivo de esta etapa es proponer el modelo con el cual se realicen las pruebas físicas para el estudio del comportamiento del modelo de mejora. Para poder determinar un cambio en el sistema, se propone trabajar con las siguientes variables:

- Flujo másico de aire en la entrada del sistema.
- Flujo másico de aire en la salida del sistema.
- Revoluciones por minuto derivadas de los flujos de análisis.
- Energía generada.

Con el uso de ambos procesos para el análisis de las variables se espera facilitar la selección del modelo más apropiado por medio de la comparación de resultados obtenidos teóricamente comparado con los de simulación.

3.1.1. Diseño Asistido por Computadora

Esta etapa se va a destinar para el diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) de la turbina que se utilizaron en los generadores de energía por oscilación de columnas de agua (OWC), LIMPET 500. También, se harán los diseños que serán la propuesta de mejora para aumentar las eficiencias de las turbinas.

El diseño se va a realizar mediante el uso del software Solidworks 2018, versión estudiantil; este software cuenta con los módulos de modelado 2D y 3D, y análisis ingenieril, que jugarán un papel importante en la elección del diseño para el modelo que reemplace el actual perfil NACA 0012, o presentar mejoras en el diseño.

Uno de las características importantes en esta sección es la iteración que se puede dar entre las secciones de modelado y análisis para ir ajustando la estructura del alabe de tal forma que apegue a las necesidades del diseño.

Una vez que se tengan los modelos de cada una de las turbinas (original y propuesta), se procederá a generar simulaciones de análisis ingenieril asistido por computadora (CAE, por sus siglas en inglés); con este se pretende tener datos lo más cercanos posible a los datos reales del comportamiento que presentan en la actualidad las turbinas Wells. Primero se hará la simulación del modelo original para tener una referencia con cual comparar los datos reales, y posteriormente comparar los resultados de las simulaciones que se realicen; de esta manera, se espera tener un mayor nivel de confianza en que los datos de las simulaciones de la turbina propuesta serán cercanos a un comportamiento en un modelo físico.

3.1.1.1. Modelado 3D

El primer paso para el diseño del nuevo alabe es el modelado 3D. Siguiendo las especificaciones de generar una alteración de 10° en la horizontal (cuerda) del alabe, y respetando el perfil geométrico NACA0012, se dibuja el bosquejo de este para su creación como objeto.

3.1.1.2. Análisis de fluidos asistido por computadora

Posteriormente, la opción de análisis de fluidos va a permitir estudiar el comportamiento del alabe que se diseñe como propuesta de mejora. El estudio consiste en la simulación del alabe bajo los efectos de las corrientes de flujo a 3m/s y 5 m/s.

En esta simulación se pretende poder visualizar el comportamiento del fluido sobre la superficie de la estructura de los álabes. El proceso consiste en utilizar el módulo de 'Flow Simulation', que nos permite recrear el ambiente bajo el que estará sometido el objeto de estudio. Para lograr la similitud del ambiente, el programa solicita información mediante una serie de pasos, los cuales se describen a continuación:

- **Objeto de estudio:** modelo sobre el que se va a realizar el análisis deseado.

- **Unidades:** se especifica el sistema de unidades con el que se está trabajando. En este caso se utiliza el sistema SI (m, kg, s)
- **Tipo de análisis:** aquí se determina si el tipo de estudio que se va a realizar es de forma externa o interna. Entiéndase por 'externo' el estudio de un objeto sobre el cual circula el flujo; por otra parte, se entiende por 'interno' el estudio en el que el flujo corre por dentro del objeto (e.g. el flujo dentro de un ducto). Para el presente caso, se hace uso de ambos tipos de análisis donde el de tipo 'externo' se utiliza para ver el comportamiento del flujo sobre la superficie del álabe, mientras que el 'interno' se utiliza para el comportamiento general del fluido sobre la turbina.
- **Fluido de trabajo:** el programa brinda una librería con amplia variedad de fluidos con los que se puede analizar. Incluye una lista de: gases, líquidos, líquidos no newtonianos, líquidos compresibles, gases reales y vapor. Como fluido de estudio de este caso se selecciona de la sección de gases al aire., el cual es el encargado de accionar o transmitir energía a la turbina.
- **Condición de pared:** se menciona la característica de la superficie sobre la que correrá el fluido.
- **Condiciones ambientales iniciales:** en este paso se permite modificar las condiciones iniciales sobre las que se va a exponer el objeto de estudio. Se puede definir los parámetros termodinámicos como los parámetros de velocidad. Es aquí donde se especifican las velocidades que se van a analizar. Se debe de tener cuidado con la selección de la dirección en la que va a circular el fluido, pues dependerá de la alineación en la que se encuentre el objeto. Para el estudio realizado se utiliza la velocidad sobre el eje 'z'.

Siguiendo esta serie de pasos es que se procede a realizar el estudio de CFD, el cual dará información deseada sobre el comportamiento del fluido sobre el alabe y el modelo de la turbina en el ducto.

3.1.1.3. Análisis de elementos finitos asistido por computadora

Al mismo tiempo que se efectúa el análisis de fluidos, se hará uso del análisis de elementos finitos; con este se verifica el comportamiento de la estructura mecánica del alabe para detectar los puntos que muestren áreas de oportunidad en el desempeño mecánico del alabe.

El estudio de deformación mecánica juega un papel importante para definir la geometría del alabe conforme a sus índices de reacción a las fuerzas que actuarán sobre la superficie. Dada la importancia de conocer las reacciones en la pieza, se debe de llevar a cabo un análisis por medio del método de elementos finitos. Este método se basa en dividir un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del objeto a analizar en una serie de subdominios que no se intersectan entre sí; a estos dominios se le conocen elementos finitos (UNAM, 2019).

El software Solidworks 2018, cuenta con el módulo de simulación mecánica ('Simulation'), con el que se realizará la simulación de la deformación de la estructura propuesta. De

este modo se busca agilizar y facilitar el proceso de definir una estructura apropiada para llegar a cumplir con los parámetros máximos de esfuerzo que soporta el material 'Onyx'.

3.1.2. Diseño Analítico

La etapa del diseño analítico se destina al cálculo teórico del comportamiento del alabe bajo la influencia de factores derivados de los flujos de aire dentro del ducto de la turbina; los cálculos se llevarán a cabo aplicando las leyes establecidas para el diseño de mecánica de fluidos y mecánica de materiales. Es por ello que en este paso de la 'Etapa I' se presentan dos tipos de estudios a realizar: flujo del aire a través del túnel de turbina, y el comportamiento mecánico del alabe. Estos estudios se realizan con la finalidad de determinar el perfil óptimo para lograr un arranque de la turbina Wells bajo la influencia de un flujo de menor incidencia en comparación con el flujo de arranque del perfil NACA 0012.

3.1.2.1. Análisis mecánico de la estructura del alabe

El análisis del comportamiento mecánico del material será analizado partiendo de los conceptos de torsión aplicada en tubos de secciones múltiples de pared delgada (Ugural, 1984).

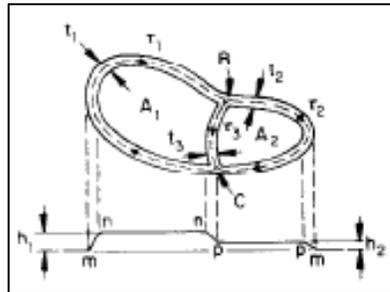


Figura 15. Diagrama de esfuerzos cortantes en un cuerpo de secciones de pared delgada (Ugural, 1984)

A continuación, se muestran y describen las ecuaciones que influyen en el estudio de deformación y esfuerzo cortante de objetos huecos con secciones de pared delgada sometidos a un momento de torsión, similar a como estaría actuando al momento de accionar el movimiento en la cola del álabe:

τ , esfuerzo cortante.

h , deflexión de la membrana.

t , espesor de la pared.

A , área encerrada por el perímetro medio de la figura.

S , perímetro medio de la sección transversal (línea punteada).

Con estas variables será posible:

$$\tau = \frac{h}{t} \quad (1)$$

$$M_t = 2Ah \quad (2)$$

$$\tau = \frac{M_t}{2At} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{h}{2GA} \oint \frac{ds}{t} \quad (4)$$

Es indispensable que, para realizar este tipo de análisis, el elemento a estudiar cumpla con la característica de ser un componente con secciones de pared delgada.

3.2. Etapa II: Prototipos

La etapa de prototipos es una etapa en donde se busca crear modelos físicos (a escala) de las turbinas (original y propuesta) para poder realizar la etapa de pruebas físicas, y medir las variables consideradas para la investigación (flujo másico de aire, revoluciones por minuto, y energía). Dentro de esta sección se implementará el uso de tecnologías para manufactura tanto convencionales como nuevas tecnologías, como lo es la manufactura aditiva, con el propósito de poder construir con la mejor calidad las piezas que completarán las estructuras que se utilizarán dentro de la etapa de pruebas físicas. Debido a esto, se genera un plan de construcción para los diferentes componentes a utilizar; también, se detalla la lista de los materiales y herramientas involucradas en esta etapa.

Dentro de esta actividad de prototipos se va a trabajar con dos ensambles y un sub-ensamble. Los ensambles que se van a armar son: modelo a escala de túnel de viento de turbina Wells, y estructura de del álabe. El sub-ensamble que se va a trabajar es el

3.2.1. Impresión 3D

Primeramente, se hará uso de las tecnologías de impresión 3D; hacer uso de esta tecnología facilitará la creación de diferentes modelos y reducirá el tiempo de fabricación que normalmente puede quitar hacer el modelo manualmente. También, se pretende conocer las ventajas y consecuencias que tiene el implementar esta tecnología para la creación de cualquier modelo a escala que sea de interés analizar.

La impresión de los modelos se realizará por medio de la máquina de impresión modelo 'Onyx One Desktop 3D Plastic Printer', de la compañía *Markforged*. Esta es una impresora de grado industrial con la capacidad de imprimir una gran diversidad de materiales; lo más importante, es su capacidad de imprimir materiales compuestos. Entre los materiales de impresión con los que trabaja se encuentra el compuesto llamado

'Onyx', que será el material con el que se trabaje para la creación de los modelos de la turbina, y para el prototipo del alabe.

El material 'Onyx' es un material compuesto que se encuentra dentro de la familia de los termoplásticos. Su composición es una mezcla de nylon reforzado con filamentos de fibra de carbono, haciendo que su estructura presente altas cualidades como material de uso industrial y gran sustituto de partes echas de aluminio.

Tabla 7. Propiedades físicas del 'Onyx'. Recuperado de: [https://support.markforged.com/hc/en-us/articles/209934486-Onyx]

Plastic Matrix	Test (ASTM)	Onyx
Tensile Modulus (GPa)	D638	1.4
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	36
Tensile Strain at Yield (%)	D638	25
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	30
Tensile Strain at Break (%)	D638	58
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	81
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.6
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145
Flame Resistance	UL94	—
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330
Density (g/cm ³)	—	1.2

Mediante el uso de esta impresora y el material 'Onyx', se hará la impresión de los componentes principales del proyecto, los cuales son:

- **Cuerpo de la turbina:** piezas 'Mitad_Sup' y 'Mitad_Inf' con escala de (1:6.66)
- **Álabes:** 'Alabe_320', el cual es el modelo que representa el alabe de perfil utilizado en la turbina del LIMPET 500. 'Alabe_320_2000', es el alabe con alteración de 10° respecto a la horizontal (cuerda), con escala de (1:6.66).
- **Estructura de turbina:** 'NACA0012_320', esta pieza es una sección que representa la estructura a escala 1:1 del alabe usado en la turbina Wells del LIMPET 500

Posteriormente, se hará uso de una impresora de tipo más convencional, con la que se crearan partes cuya morfología no impactan en el diseño de la turbina. La impresora que se utilizará es la 'Ultimaker 3 Extended', con capacidad de impresión de materiales como el nylon, ABS, y PLA.

Las partes que se van a imprimir, cuyo propósito es el de complementar funciones externas al comportamiento aerodinámico de los alabes, son:

- **Masa de tracción de turbina:** la pieza 'Traccion_Turbina', es la encargada de trabajar como la masa de sujeción entre la turbina y la flecha que permite el transmitir la energía del aire en torque.
- **Disco de medición de RPM:** el disco 'RPM_Disco_Perforado', el cual servirá para realizar mediciones de RPM derivadas de los diferentes flujos de aire en la turbina.

La impresión de estas partes sería todo lo que se necesitaría realizar por parte de las técnicas de manufactura aditiva, o impresión 3D.

3.2.2. Maquinado: fresa y torno.

Por parte de técnicas de manufactura convencional, se considera hacer uso de máquinas tipo torno y fresadora. Las máquinas que se consideran son de la marca Birmingham; el torno es un modelo YCL-1440, y la fresadora un modelo BPS-1649.

Con el uso de estos equipos se van a crear dos piezas que forman parte fundamental en el cuerpo de la carcasa del túnel de la turbina:

- **Soporte central:** el soporte central 'Soporte_Turbina', es un componente que se va a utilizar para permitir la rotación de la turbina; en estos soportes se instalará la flecha rígida que permita la transmisión de energía mecánica para ser transformada a eléctrica. Al mismo tiempo, estos soportes permitirán la alineación de la turbina dentro del túnel de viento. Se crearán dos soportes de este tipo en la máquina BPS-1649.
- **Flecha:** la flecha 'Flecha_Turbina' será el medio de transmisión de la energía mecánica que se genere por la turbina. Esta parte se maquina en la máquina YCL-1440.

De esta manera se fabricarían las piezas no comerciales que se necesitarán para la construcción del proyecto. Por otra parte, se deberán conseguir los materiales que forman parte del mecanismo, así como de la estructura en sí.

3.2.3. Módulo de medición

El módulo de medición es un sub-ensamble que se va a utilizar para la medición y monitoreo de las variables de estudio en el modelo a escala de la turbina. Este sub-ensamble se compone de cuatro sistemas: sistema de monitoreo, sistema de medición de RPM, sistema de medición de flujo de aire, y medición de energía.

El sistema de monitoreo consiste en una tarjeta electrónica que cumple con la función de una computadora en tamaño mini (85mm H x 56.5mm B x 17mm T), de la marca 'Raspberry Pi', modelo '3 B+'. Con esta computadora se pretende escribir la programación para la interpretación de los datos que arrojen los sensores de medición. También, servirá para hacer un registro de los datos obtenidos en los sensores de RPM y energía; el anemómetro es un componente externo que realiza las mediciones de manera individual.

Para la medición de RPM se utilizará un método de medición por medio de pulsaciones o interrupciones de un sistema de sensores infrarrojos.

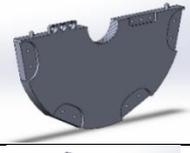
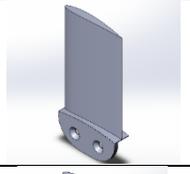
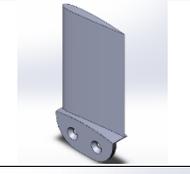
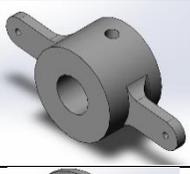
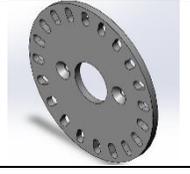
3.2.4. Componentes de miscelánea

Los componentes restantes que serán necesarios para el ensamble del prototipo se conseguirán con distribuidores de la localidad, o distribuidores externos en caso de ser necesario. Esto aplica tanto para el ensamble de túnel de viento como para la réplica del alabe NACA0012.

3.2.5. Materiales y componentes

El material necesario para el ensamble final de cada uno de los prototipos se muestra en la Tabla 8 y Tabla 9, donde se dividen las secciones de (la Tabla 8 muestra los materiales para el sub-ensamble de la parte de monitoreo del túnel de viento): nombre de parte (archivo), descripción, modo de adquisición, material.

Tabla 8. Componentes para modelo a escala del LIMPET 500.

#	Imagen	Nombre	Descripción	Material	Modo de adquisición
1.		'Mitad_Sup'	Cuerpo de turbina	Onyx	Impresión 3D
2.		'Mitad_Inf'	Cuerpo de turbina	Onyx	Impresión 3D
3.		'Alabe_320'	Modelo a escala del álabe original	Onyx	Impresión 3D
4.		'Alabe_320_2000'	Modelo a escala de álabe propuesto	Onyx	Impresión 3D
5.		'Traccion_Turbina'	Masa para sujeción de turbina y flecha.	PLA	Impresión 3D
6.		'Disco_RPM_Perforado'	Disco para conteo de RPM.	PLA	Impresión 3D

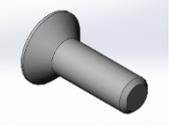
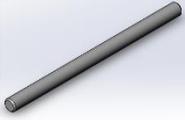
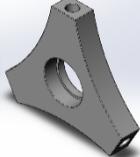
7.		Tornillos	Tornillo M4 x 0.7 x 0.5" L	Acero Inoxidable	Proveedor
8.		Flecha	Flecha de 0.750" O.D. x 12" L	Aluminio	Maquinado/YCL-1440
9.		Soportes	Soporte para flecha y turbina en túnel de viento.	Aluminio	Maquinado/BPS-1649
10.		Baleros	Balero 6203 2RS 3/4" I.D.	Acero	Proveedor
11.		Varilla roscada	Varilla roscada 1/2" - 13 UNC	Acero	Proveedor
12.		Tuercas	Tuerca hexagonal 1/2" - 13 UNC	Acero	Proveedor
13.		Ducto	Ducto de 400 mm O.D. x 1220 mm L	Latón	Proveedor
14.		Motor/Generador DC	Motor de 12VDC	Variedad	Proveedor

Tabla 9 Componentes de sistema de monitoreo para medición de datos.

#	Imagen	Nombre	Descripción	Material	Modo de adquisición
15.		Raspberry Pi	Sistema de programación y monitoreo	Plástico	Proveedor
16.		Sensor IR.	Sensor infrarrojo para conteo de interrupciones.	Variado	Proveedor
17.		INA-260	Módulo de medición de poder (voltaje, corriente, potencia).	Tarjeta electrónica	Proveedor
18.		TESTO 405i	Anemómetro inalámbrico para medición de flujos en ductos.	Variedad	Proveedor

3.3. Etapa III: Pruebas físicas

La etapa de pruebas físicas de los modelos propuestos dará inicio a las pruebas experimentales de laboratorio, una vez que se tienen definidos los modelos físicos. Las pruebas se harán dentro de un túnel de viento para la obtención de los coeficientes característicos de los perfiles (para el caso del análisis del álabe).

Las pruebas de laboratorio se realizarán en

También, se hará medición de las variables propuestas con diferentes niveles de flujos de aire por medio del uso de túnel de viento.

Las turbinas serán sometidas a diferentes flujos de aire, los cuales se dividirán en:

1. Corrientes de flujos constantes a flujos altos de aire: *los prototipos serán sometidos a flujos constantes de aire en un perfil de flujo alto, simulando las corrientes de alto flujo generadas por climas de oleaje alto. Se hará uso del túnel de viento.*
2. Corrientes de flujos constantes a flujos bajos: *los prototipos serán sometidos a flujos constantes de aire en un perfil de flujo bajo, simulando las corrientes de bajo flujo generadas por climas de oleaje bajo. Se hará uso del túnel de viento.*

Capítulo 4. Resultados

Dentro de este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada una de las secciones descritas en la metodología del proyecto; se hace uso de apoyos visuales y gráficos que representan lo obtenido para el análisis de cada una de las variables de estudio propuestas; también, se presentan las debidas comparaciones entre los datos arrojados en cada una de los pasos propuestos en el capítulo anterior.

4.1. Modelado 3D

Siguiendo los parámetros de diseño de la turbina Wells utilizada en el sistema LIMPET 500, se obtuvieron los datos de la Tabla 11, donde se citan 8 diferentes parámetros:

Tabla 11. Parámetros de diseño para el cuerpo y álabes de la turbina original (100%) y modelo (15%).

%	100	15
Aspas	7	7
Grados	51.43	51.43
Da	2600	390
Di	1612	241.80
H	494	74.10
Chord	320	48
hub/tip	0.62	0.62

Las variables que se muestran en la tabla son los valores que se obtuvieron para poder diseñar el modelo a la escala del 15%. El significado de cada una de las variables se muestra a continuación:

‘%’, escala o proporción a la que se encuentra el objeto de estudio

‘Aspas’, cantidad de aspas con las que cuenta la turbina.

‘Grados’, distancia angular entre cada aspa de la turbina.

‘Da’, diámetro total de la turbina.

‘Di’, diámetro del eje o masa de la turbina.

‘H’, altura que posee cada una de las aspas; es la distancia de Di hasta Da.

‘Chord’, cuerda del alabe.

‘hub/tip’, relación de distancia entre el diámetro del aspa con el diámetro del eje o masa de turbina

Estos datos obtenidos sirvieron para hacer la reducción escalar de todos los aspectos de la turbina y, así, poder generar un análisis más apegado al comportamiento real de la turbina. Uno de los aspectos más importantes es el de 'hub/tip', pues permite conocer la relación de porcentaje entre el cuerpo de la turbina y las aspas.

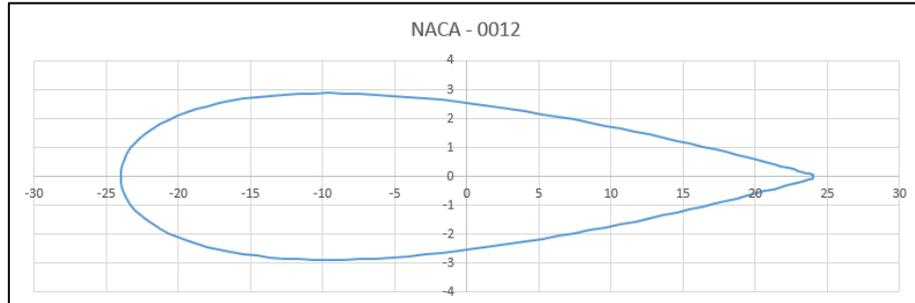


Figura 16. Perfil de coordenadas para el perfil geométrico NACA0012.

Por otra parte, se determinó el perfil de coordenadas de los alabes, tanto el original como el modificado a 10° ; donde se obtuvo un archivo '.csv', del sitio 'Airfoil Tools'. La representación del bosquejo 2D de las coordenadas se muestran en las figuras Figura 16 y Figura 17, donde la primera corresponde al perfil simétrico NACA-0012, y el segundo al perfil propuesto para su estudio.

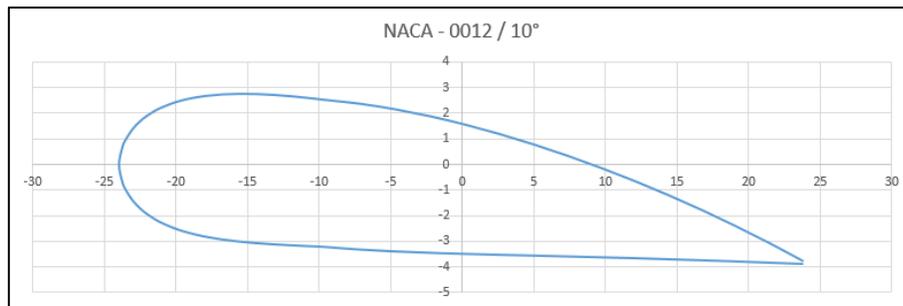


Figura 17. Perfil de coordenadas para el perfil geométrico propuesto, NACA0012/10°.

Con estos perfiles de coordenadas se pudo seguir con el proceso de modelado de alabes. Se generaron dos tipos de alabes para su estudio: NACA0012 y el NACA0012/10°. Ambos perfiles se muestran en las figuras Figura 18 y Figura 19, derivados del trazado de curvas por coordenadas.

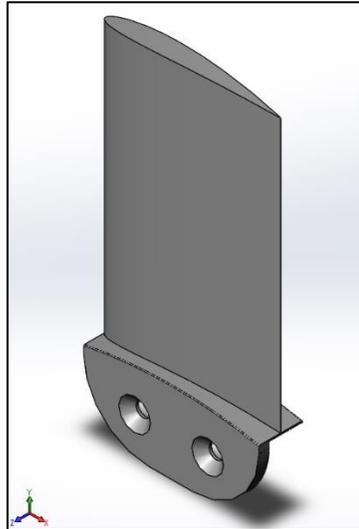


Figura 18. Modelado CAD del alabe con perfil NACA0012.

Las dimensiones características de ambos alabes son las que se muestran en la Tabla 11, en la columna de escala al 15%.

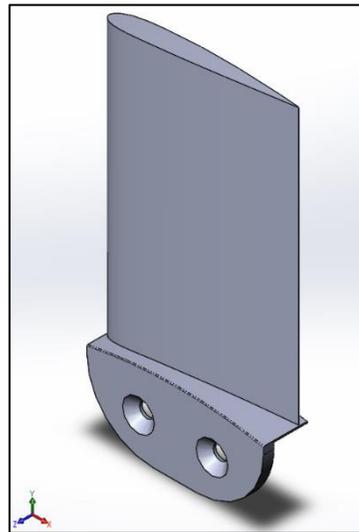


Figura 19. Modelado CAD del alabe con perfil NACA0012/10°.

Una vez obtenidos los alabes de la turbina a escala 15%, fue posible hacer el modelado del resto del cuerpo de la turbina. En la Figura 20 se observa el ensamble del cuerpo de la turbina y los alabes 'NACA0012/10°'. El cuerpo de la turbina se puede observar partido a la mitad; este diseño se hizo de esta manera para permitir que la impresora 3D fuera capaz de imprimirla, dada la capacidad de volumen máximo excedido del volumen de impresión de la máquina.

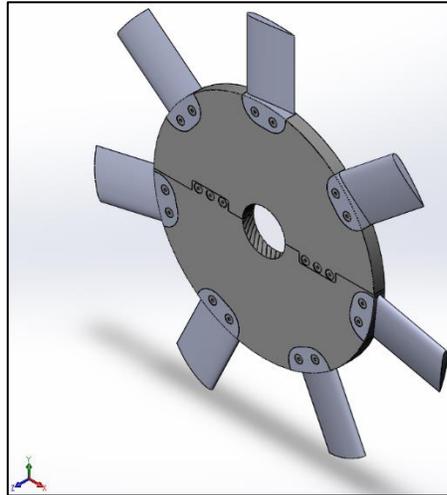


Figura 20. Ensamble del cuerpo de turbina con álabes NACA0012/10°.

4.2. Análisis de fluidos asistido por computadora

Una vez generado el modelado 3D, es posible llevar a cabo el análisis por computadora. En esta sección se muestra el perfil de presiones que actúa sobre la superficie de cada uno de los alabes que se seleccionaron para analizar: NACA0012 y NACA0012/10°. Los estudios que se realizaron fueron bajo flujos de aire a velocidades de 3m/s y 5m/s, que representan el rango de las velocidades de arranque en una turbina de viento.

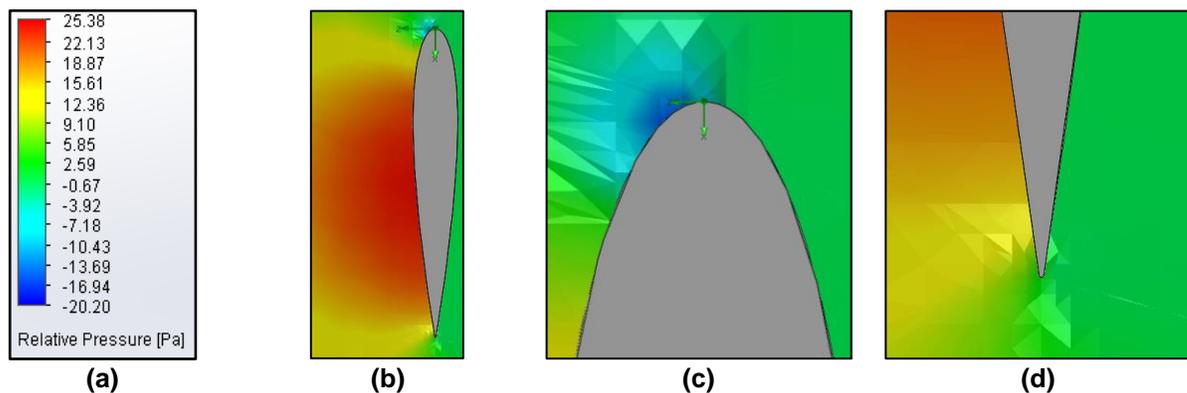


Figura 21. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012, con flujo de 5 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.

En la Figura 21 se muestra el perfil de presiones que actúa sobre la superficie del alabe NACA0012, a una velocidad de flujo de 5m/s. La escala de presión relativa (a) nos muestra el rango de presiones que interactúan sobre el alabe en sí. Se puede observar que un valor de aproximadamente de 25 Pa actúa en gran parte en la superficie del perfil (b), donde el color predominante es de color rojo. Haciendo un acercamiento más

detallado a la punta del alabe (c), en la parte superior del alabe, se observa un perfil de presión negativa, que indica un vacío activo frente al alabe; por otra parte, en la cola del alabe (d) se observa que existe una presión positiva. Este comportamiento nos indica que el alabe va a tener un movimiento en dirección de la cola a la punta del perfil.

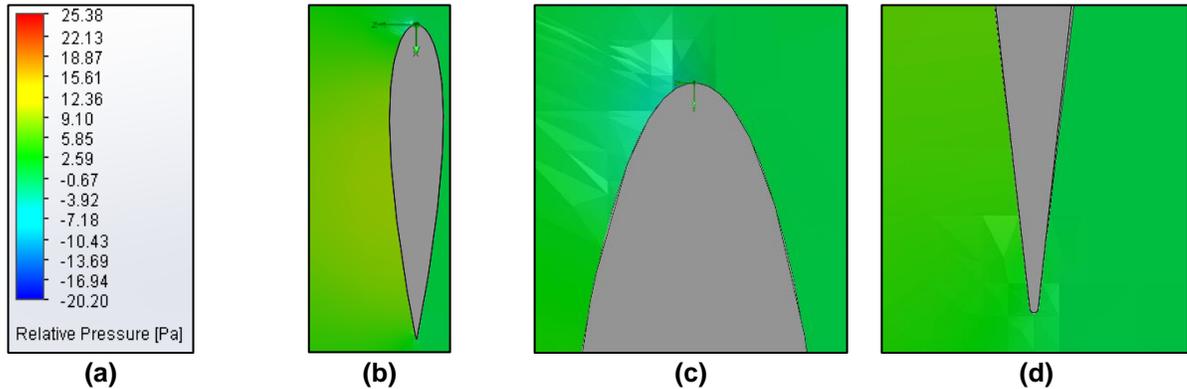


Figura 22. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012, con flujo de 3 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.

El estudio de a un flujo más bajo, a 3 m/s, se muestra en la Figura 22. En las imágenes se puede observar un comportamiento diferente del alabe cuando se encuentra en un flujo de menor velocidad. El perfil de presión (b) disminuye drásticamente de 25 Pa a unos escasos 6 Pa, mientras que el vacío que se observaba en la Figura 21 (c), disminuyó de igual forma, quedando en -3 Pa. Esta pérdida de presión en la superficie del alabe es el que diferentes autores mencionan que genera que la turbina tienda a detenerse.

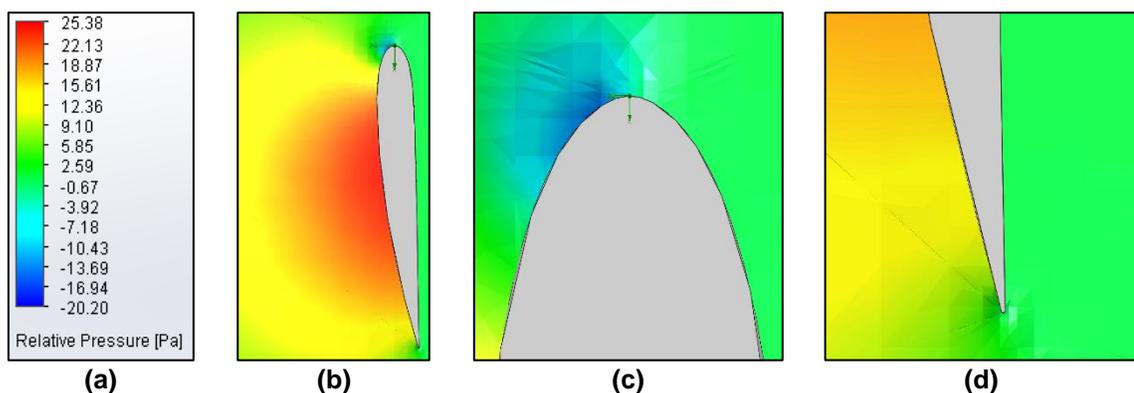


Figura 23. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012/10°, con flujo de 5 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.

Haciendo el mismo análisis con un flujo de aire a velocidad de 5m/s, pero ahora sobre el perfil NACA0012/10° (Figura 23), se observan comportamientos similares a los obtenidos en el perfil NACA0012. En el perfil de presión (b) se ve un área de alta presión actuando sobre la superficie que ronda en los 25 Pa, similar a lo obtenido en el otro perfil, pero con un área de presión ligeramente más pequeña a la obtenida en el primer perfil. La punta de este alabe (c), también se ve afectada por una sección de vacío que llega hasta los 20 Pa negativos; por otra parte, la cola (d) se ve accionada por un perfil de presión media (13 Pa, aproximadamente), muy similar al NACA0012.

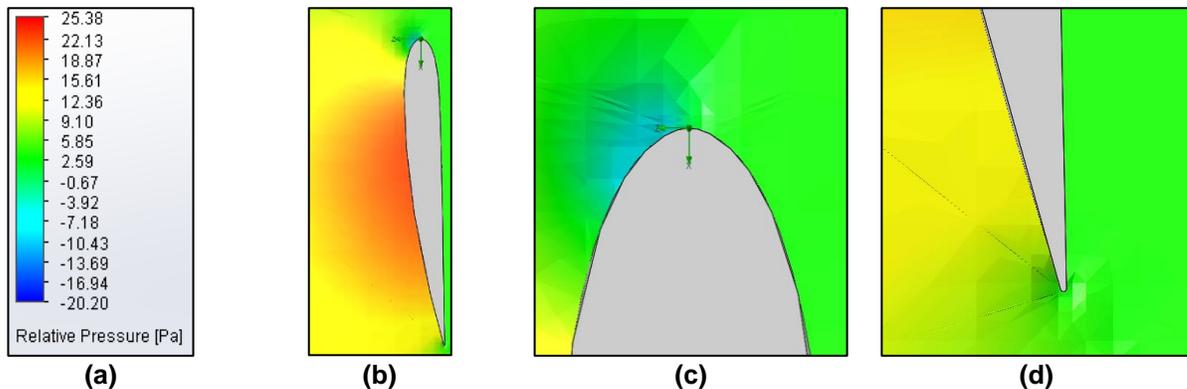


Figura 24. Perfiles de presión sobre perfil NACA0012/10°, con flujo de 3 m/s. La figura (a) es la escala de presiones. La figura (b) es la vista completa del perfil. En la figura (c) se visualiza el perfil de presión al vacío de la punta del álabe. En la figura (d) se muestra un acercamiento al comportamiento de la cola del álabe.

La diferencia más importante se observó en el comportamiento del alabe NACA0012/10° (Figura 24), fue bajo la influencia de un flujo de 3 m/s, donde el comportamiento del perfil de presiones presentó una diferencia alta al perfil presente en la superficie del alabe NACA0012 (Figura 22). La diferencia que se aprecia a más simple vista es el perfil de alta presión que se sigue manteniendo sobre la superficie del alabe (b), donde la presión decrece a 18 Pa, aproximadamente; por otra parte, la punta del alabe (c) sigue mostrando un perfil de vacío alto, rondando en los 10 Pa de vacío.

El comportamiento obtenido en flujo de aire a baja velocidad en ambos perfiles es un apoyo que ayudara a definir si el diseño de nuevo perfil se acepta o no. Los resultados se muestran inclinados a un resultado positivo, pero aún se va a confirmar con el estudio de pruebas físicas de la turbina.

4.3. Ensamble de modelo de turbina

Dados resultados obtenidos en la simulación del análisis de flujos, se dio paso a construir el modelo físico de la turbina Wells a 1:6.6 con la que se busca comprobar que el inicio de arranque de la turbina con el perfil NACA0012/10° es más efectivo en flujos bajos, a diferencia del perfil NACA0012.



Figura 25. Sub-ensamble del cuerpo de la turbina junto con álabes.

En la Figura 25 observamos la turbina ensamblada, de la cual las partes de color negro (alabes y cuerpo de la turbina) fueron impresas en material Onyx; el centro de la turbina (color amarillo), donde se generará la tracción de la turbina, se creó de material PLA. La sujeción de las partes se realizó con tornillos M4 x 0.7 de 0.5" de largo.



Figura 26. Ensamble físico de cuerpo de turbina con el soporte de la turbina.

Posteriormente al ensamble del cuerpo del modelo de turbina, se instaló en el sub-ensamble del cuerpo motriz y de soporte para la turbina (Figura 26). Este soporte se maquinó de placa de aluminio de 0.75" de grosor, y de una barra de aluminio de 0.75" de diámetro, con la que se fabricó la flecha.

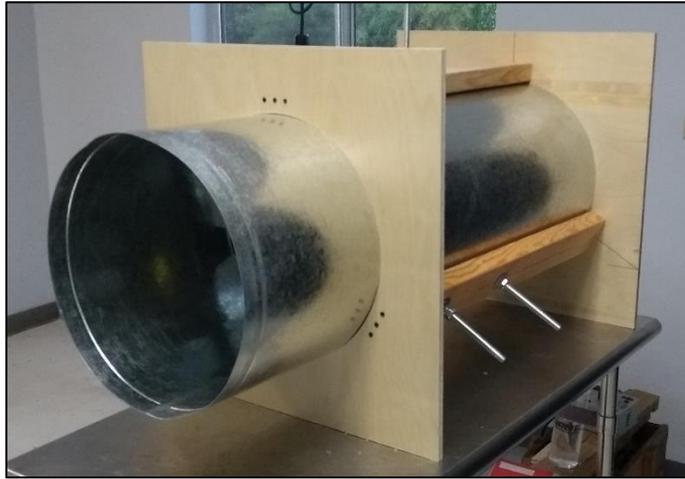


Figura 27. Ensamble de estructura de túnel de viento para simular corrientes de aire en turbina.

Por último, el ensamble se completó al instalar los sub-ensambles del cuerpo de turbina y soporte de turbina dentro del túnel de viento (Figura 27). El túnel se fabricó de ducto de hojalata, para contener el flujo de aire y poder guiarlo hacia la turbina. El exterior del tubo se hizo de madera, con la que se realizó una estructura que diera rigidez al ensamble y evitar posibles vibraciones en el tubo o soporte. También, se instalaron varillas roscadas de 0.5" para sujetar la turbina en el interior del túnel, y para poder calibrar la turbina al centro del ducto (Figura 28).



Figura 28. Turbina Wells 1:6.667 instalada en el túnel de viento para medición de parámetros.

4.4. Resultado de mediciones de pruebas físicas

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas físicas que se realizaron mediante el uso del prototipo de túnel de viento para el modelo de la turbina Wells. Las pruebas que se realizaron fueron para visualizar y medir la velocidad del flujo al cual inicia a girar la turbina con cada uno de los perfiles propuestos. Del mismo modo, se realiza

una medición de los flujos a los cuales se detienen después de que lograron generar un giro estable pero el flujo de aire disminuye. Por último, se hace una medición para comparar la velocidad de giro respecto a un aumento gradual del flujo de 0.5 m/s a 12.5 m/s.

Tabla 12. Mediciones de velocidades de flujo de aire para iniciar arranque de turbina. Pruebas en perfil NACA0012 y NACA0012/10°.

	Condición de Arranque	
	Velocidad de Flujo(m/s)	
	NACA0012	NACA0012_10D
1	9.42	8.00
2	9.02	8.59
3	8.97	8.64
4	9.12	8.00
5	9.02	8.21
6	9.40	8.08
7	9.33	8.46
8	9.44	8.43
9	9.58	8.16
10	9.09	8.19
11	9.48	8.16
12	9.43	8.37
13	9.38	8.57
14	9.00	8.28
15	9.53	8.46
16	9.17	8.11
17	9.62	8.01
18	9.48	8.34
19	9.41	8.49
20	9.29	8.03
21	9.03	8.56
22	9.15	8.33
23	9.35	8.39
24	9.31	8.08
25	9.45	8.32

La Tabla 12 muestra los datos recolectados de 25 corridas que se realizaron para poder obtener la velocidad del flujo de aire a la que cada uno de los alabes inicia su giro. Para el perfil NACA0012 se registró un flujo máximo de 9.62 m/s y un flujo mínimo de 8.97 m/s para iniciar giro. Por otra parte, el perfil NACA0012/10° registró un flujo máximo de 8.64 m/s y un flujo mínimo de 8.00 m/s. Para cada álabe se realizaron 25 corridas, de las que se obtuvieron los datos presentados.

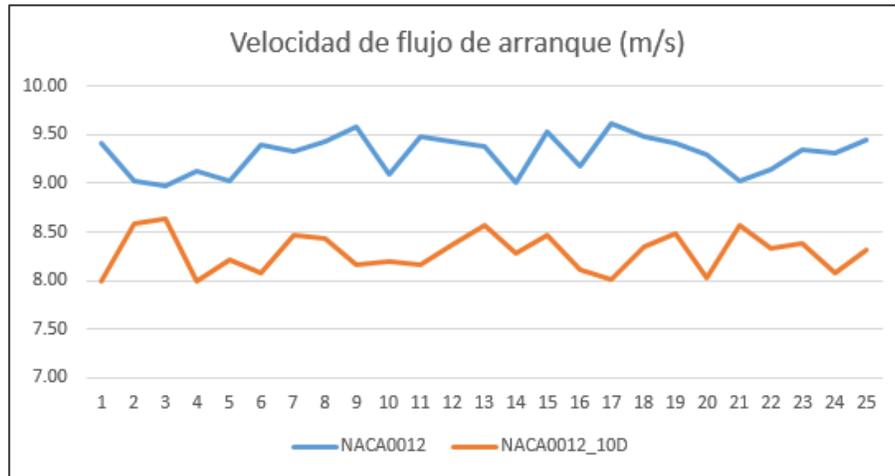


Figura 29. Gráficos del comportamiento de arranque de turbina. En azul se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para iniciar giro del perfil NACA0012. En rojo se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para iniciar giro del perfil NACA0012/10°.

El comportamiento de ambos perfiles se muestra en la Figura 29, en la cual se observa que el comportamiento se cada una se mantuvo estable dentro de un rango de 0.64 m/s de diferencia entre pico y pico de cada perfil. También, se demuestra que la velocidad promedio de cada perfil fue de 9.30 m/s para el perfil NACA0012 (azul), y de 8.29 m/s para el perfil NACA0012/10°. Esto da como resultado una diferencia de arranque de 1.01 m/s entre un perfil y otro, siendo el propuesto el que requiere de menor flujo para comenzar el giro de la turbina.

Tabla 13. Velocidades promedio de las corridas de cada perfil, y la eficiencia de arranque respecto al perfil NACA0012.

Cambio de eficiencia	
<i>V1 (m/s)</i>	9.30
<i>V2 (m/s)</i>	8.29
<i>ΔV (m/s)</i>	1.01
<i>n (%)</i>	10.84

La Tabla 13 muestra los valores promedio de velocidad de flujo a la que la turbina comienza a girar. Con estos valores se puede obtener un cálculo en el aumento de la eficiencia de arranque que presentó la turbina, siendo de la siguiente manera

$$n(\%) = \frac{(V_2 - V_1)}{V_2} * 100 \quad (5)$$

Este cálculo arroja como resultado 10.84%, el cual indica un aumento en la eficiencia de arranque al utilizar el perfil NACA0012/10°.

Tabla 14. Mediciones de velocidades de flujo de aire para detener giro de turbina. Pruebas en perfil NACA0012 y NACA0012/10°.

	Condición de Frenado (Stalling)	
	Velocidad de Flujo(m/s)	
	NACA0012	NACA0012_10D
1	7.67	4.50
2	7.34	4.40
3	7.56	4.42
4	7.41	4.50
5	7.60	4.43
6	7.41	4.41
7	7.65	4.55
8	7.38	4.43
9	7.47	4.38
10	7.50	4.46
11	7.55	4.32
12	7.55	4.34
13	7.52	4.32
14	7.44	4.47
15	7.36	4.32
16	7.58	4.52
17	7.48	4.40
18	7.60	4.50
19	7.51	4.40
20	7.57	4.43
21	7.45	4.32
22	7.55	4.45
23	7.46	4.50
24	7.43	4.52
25	7.52	4.34

Por otro lado, en la Tabla 14 se muestran valores obtenidos para detectar a qué velocidad de flujo de aire se detiene la turbina con cada uno de los álabes. Para el modelo NACA0012 se obtuvo una velocidad máxima de 7.67 m/s y una mínima de 7.34 m/s. Para el modelo propuesto NACA0012/10° se obtuvo una velocidad máxima de 4.55 m/s y una mínima de 4.32 m/s. Esto se visualiza más fácilmente en la Figura 30. Para cada uno de los perfiles se realizaron 25 corridas para obtener una medición lo más estable posible.

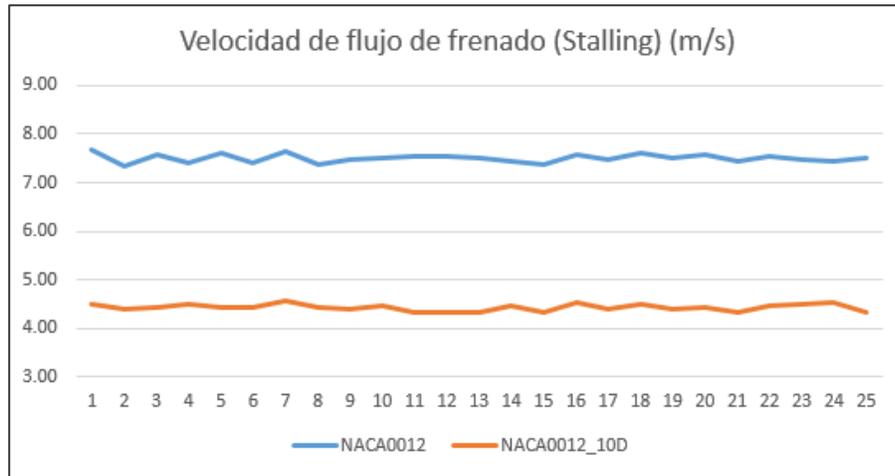


Figura 30. Gráficos del comportamiento de frenado de turbina. En azul se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para frenar giro del perfil NACA0012. En rojo se muestra la línea que representa la velocidad de flujo de aire para frenar giro del perfil NACA0012/10°.

La gráfica de velocidad de flujo de frenado (Figura 30) muestra que el comportamiento del álabo NACA0012 (azul) se frena a una velocidad promedio de flujo de aire de 7.50 m/s, mientras que el perfil propuesto NACA0012/10° (rojo) arroja una velocidad promedio de frenado de 4.43 m/s; esto nos da una diferencia de 3.07 m/s. esto indica que el perfil propuesto se desempeña de mejor manera en flujos de menor velocidad que el perfil original.

Tabla 15. Velocidades promedio de frenado de las corridas de cada perfil, y eficiencia de aprovechamiento de flujo respecto al perfil NACA0012.

Cambio de eficiencia	
<i>V1 (m/s)</i>	7.50
<i>V2 (m/s)</i>	4.43
<i>ΔV (m/s)</i>	3.08
<i>n (%)</i>	41.02

La Tabla 15 muestra los valores promedio de velocidad de flujo a la que la turbina se detiene por completo, sin importar que siga existiendo un flujo de aire en el túnel. Con estos valores se puede obtener un cálculo en el aumento de la eficiencia de aprovechamiento de flujos a bajas velocidades por parte de la turbina con los diferentes alabes. La eficiencia se obtiene de la siguiente manera:

$$n(\%) = \frac{(V2-V1)}{V2} * 100 \quad (5)$$

Este cálculo arroja como resultado 41.02%, el cual indica un aumento en la eficiencia de aprovechamiento de flujo a baja velocidad al utilizar el perfil NACA0012/10°.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusión General

Como idea inicial de investigación se entendía que realizar una alteración a la cola del perfil NACA0012 en 10° respecto a la horizontal del álabe (cuerda), brindaría beneficios a la eficiencia de arranque de la turbina Wells, dentro del sistema LIMPET 500.

Conforme se fue adentrando en el análisis de la propuesta, se fueron encontrando resultados favorables a la propuesta de investigación:

- Los análisis de flujo que se realizaron de manera computacional dieron como resultado valores de perfil de alta presión sobre la superficie del álabe NACA0012, para una velocidad de flujo de aire moderadamente alto (5 m/s); en cuanto al perfil NACA0012/ 10° , bajo las mismas condiciones de flujo, arrojó resultados como se esperaba: un perfil de presiones similar, pero con un valor más bajo de presión, debido a la geometría cuya característica se espera no funcione a altas velocidades.
- Respecto al segundo análisis de simulación, a un flujo de aire a baja velocidad, el perfil NACA0012 se comportó como se tenía previsto: el perfil de presión que actuando sobre la superficie del alabe era muy baja, o nula, prácticamente. A diferencia de este, el perfil NACA0012/ 10° tuvo un mejor desempeño, tal como se esperaba fuera el comportamiento del perfil. El volumen de presión actuando sobre la superficie del alabe propuesto tiene un cambio muy ligero de aproximadamente 2 Pa respecto al perfil de presión a 5 m/s; con estos resultados se dan datos que ayudan a reforzar la afirmación de que el perfil NACA0012/ 10° es una opción viable que se puede considerar para la alteración del perfil original en vías de tener una mejor eficiencia de arranque. Para poder afirmar completamente que se cumple, se toman en cuenta los resultados obtenidos de las pruebas físicas al modelo de turbina Wells.

La estructura construida para las pruebas del prototipo de turbina permitió observar el comportamiento de la turbina bajo los efectos de los flujos de aire, con lo que se le dio más fuerza a la afirmación del proyecto de investigación:

- Los resultados observados a simple vista, sin mediciones, demostraron que la turbina se comporta de diferentes maneras al hacer el análisis de cada alabe, donde la NACA0012/ 10° fue la que tuvo un arranque a menores velocidades de flujo. Al momento de realizar mediciones, se confirmó lo esperado: se obtuvo una mejora en el arranque de la turbina.
- Tras realizar las mediciones de velocidad de flujo de aire para iniciar arranque de la turbina, se obtuvieron las velocidades promedio de ambos alabes, y se detectó una diferencia de 1.01 m/s entre el arranque de uno y el otro perfil, siendo el NACA0012/ 10° el que tuvo un arranque a menor flujo (8.29 m/s); mientras tanto, el perfil NACA0012 tuvo una velocidad promedio de arranque de más alta (9.30 m/s).

- También, es importante mencionar el resultado obtenido en la Tabla 15, donde se obtuvo una diferencia de 3.08 m/s entre los flujos para el parado total, siendo el NACA0012/10° el que tiene la capacidad de seguir girando en bajos flujos de aire. Se observó una eficiencia del 41.02%, más arriba de lo esperado.

Con estos resultados se confirma que la eficiencia de una turbina Wells puede mejorarse al modificar su perfil geométrico. Para efectos de este estudio, se mejoró la eficiencia de flujos de velocidad baja en un 10.84%, 7.84% más de lo esperado obtener. También, se mejoró la eficiencia de parado de giro en un 41.02%.

5.2. Conclusión de Hipótesis

Con los datos mostrados anteriormente, en los que se demuestra que el perfil de presiones de la simulación indica baja influencia sobre la superficie del perfil NACA0012 en bajo flujo, pero una alta influencia en el perfil NACA0012/10°, y que también la velocidad de arranque es mejor en el perfil propuesto, se afirma la hipótesis propuesta. Un re-diseño en el perfil geométrico de las aspas de las turbinas Wells, mediante la alteración de la cola en 10° respecto a la horizontal, si aumenta la eficiencia de arranque del método OWC en un 10.84%. De este modo, se puede proceder a proponer una estructura que sea capaz de alterar la cola del álabe durante el funcionamiento de la turbina.

5.3. Trabajo a futuro

Gracias a los resultados obtenidos en el trabajo experimental presentado anteriormente, es posible dar paso a la construcción de la estructura y mecanismo que se menciona en la sección '3.1.1.3. *Análisis de elementos finitos asistido por computadora*'. Esta es una propuesta de trabajo que se ha ido desarrollando a la par junto el análisis de flujo, pero que no se podía aceptar su continuidad hasta que se confirmara la hipótesis propuesta en este proyecto.

El trabajo que resta de esta investigación será el proponer la estructura final de alabe para su análisis de deformación mecánica, y su comportamiento bajo el ambiente de trabajo al que debe de ser sometido. Se debe entregar una lista de materiales y componentes para la construcción final de dicho alabe, el cual sea capaz de alterar su geometría de NACA0012 a NACA0012/10°.

Lista de referencias bibliográficas

- [1] Kim T., Setoguchi T., Kinoue Y. (2001). Effects of blade geometry on performance of wells turbine for wave power conversion. *J. of Therm. Sci.* (2001) 10: 293. <https://ebiblio.cetys.mx:4083/10.1007/s11630-001-0035-4>
- [2] Ying Cui, Beom-Soo Hyun (2016). Numerical study on Wells turbine with penetrating blade tip treatments for wave energy conversion. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. Volume 8, Issue 5, September 2016, Pages 456-465
- [3] Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki Setoguchi (2014). Effect of Blade Shape on the Performance of Wells Turbine for Wave Energy Conversion. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering* Vol:8 No:12, 2014
- [4] Tapas Kumar Das, Paresh Halder and Abdus Samad (2017). Optimal design of air turbines for oscillating water column wave energy systems: A review. *The International Journal of Ocean and Climate Systems* 2017, Vol. 8(1) 37–49
- [5] Moñino A., Medina-López E., Bergillos R.J., Clavero M., Borthwick A., Ortega-Sánchez M. (2018). Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Problem for Turbine Performance. In: *Thermodynamics and Morphodynamics in Wave Energy*. SpringerBriefs in Energy. Springer, Cham. Pp 1-6, 45-65.
- [6] Contreras A. M., García G., Icaza B (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. En: *Cuadernos de divulgación ambiental*. SEMARNAT.
- [7] Reuters (2012). A history of BP's US disasters. Review: *Telegraph Diary*. United Kingdom. Nov, 2012.
- [8] Çakmak M., İsbir B. (2015) Government Incentives and Supports for Renewable Energy. In: Bilge A., Toy A., Günay M. (eds) *Energy Systems and Management*. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham.
- [9] Cruz, J. (2008). *Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives*. Springer (2008). ISBN 978-3-540-74894-6 [https://ebiblio.cetys.mx:3790/chapter/10.1007/978-3-540-74895-3_5]
- [10] Falcão, A.F.O., Henriques, J.C.C. & Gato, L.M.C. J. (2016). Air turbine optimization for a bottom-standing oscillating-water-column wave energy converter *Ocean Eng. Mar. Energy* (2016) 2: 459. [<https://doi.org/10.1007/s40722-016-0045-7>]
- [11] Webb I., Seaman C., Jackson G., (2005). *Marine energy challenge: Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report*. Carbontrust, Arup Energy, 2005. [<https://www.carbontrust.com/media/173555/owc-report.pdf>]
- [12] The Queen's University of Belfast (QUB), 2002. Report: Islay LIMPET wave power plant. JOR3-CT98-0312, The European Commission. 2002 [https://cordis.europa.eu/docs/publications/6662/66628981-6_en.pdf]

Energías Renovables

- [13] Merino L. (N/A) “Energías Renovables para todos”. Haya Comunicación, Editorial. Iberdrola.
- [14] Schallenberg J., Piernavieja G., Hernández C., Unamunzaga P., García R., Díaz M., Martel G., Padilla J., Subiela V. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. 1er Edición. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. ISBN 978-84-69093-86-3
- [15] Madrid Solar (2006). Guía de la energía solar. Caja Madrid. Industrias Graficas el Instalador, S.L., Madrid. [<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-solar-fenercom.pdf>]

Revolución Industrial

- [16] Burgaleta R., Campos M., Lázaro M., Lozano J., Ocaña J., De la Torre J. (2010). Capítulo 4: Revolución Industrial. Geografía e historia. Ministerio de educación, cultura y deporte. CIDEAD, España. [<http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esohistoria/quincena4/textos/quincena4pdf.pdf>]
- [17] Roel V. (1998). La tercera revolución industrial y la era del conocimiento. 3er edición. Lima: UNMSM, Fondo Editorial, 1998. P. 185-188. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/libros/historia/tercera_revoluc/caratula.htm]
- [18] Ahmed S. Shehata, Qing Xiao, Khalid M. Saqr, Day Alexander (2016). Wells Turbine for Wave Energy Conversion.
- [19] Queen’s University of Belfast, Wavegen Ireland Ltd., Charles Brand Ltd., Kirk McClure Morton, IST Portugal (2002). Islay LIMPET wave power plant.
- [20] Sridhar Kota (2018). Flexsys
- Viscidi L. (2018). “México’s Renewable Energy Future”. Wilson Center, México Institute. May, 2018.
- [21] Ortiz G. (2017). “Cartera de Necesidades y Desarrollo Tecnológico: Energía del Océano”. Instituto Mexicano del Petróleo. SENER.
- [22] Thorpe T.W. (1999). “A Brief Review of Wave Energy”. Department of Trade and Industry, UK.
- [23] Shehata, Ahmed and Xiao (2016). “Wells Turbine for Wave Energy Conversion: A Review”. International Journal of Energy Research.
- [24] Kota S. (2007). “High Efficiency Adaptive Blades for Wind Turbines”. FLEXSYS INC, Ann Arbor, MI.
- [25] Bonifacio E. (2010). “Wave Energy”. Physics 240, Stanford University.
- [26] University of Hawaii (2014). “Waves”. Hawaii University Courses. Manoa.