



Diseño de un sistema de aprovechamiento indirecto de la energía undimotriz

Mauricio Tamayo Gómez

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Buga, Colombia
Año 2020

Diseño de un sistema de aprovechamiento indirecto de la energía undimotriz

Autor:

Mauricio Tamayo Gómez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director:

Ing. German Alejandro Ibarra Bolaños. M.sc

Línea de investigación:

Aprovechamiento de energías renovables

Semillero de investigación:

Mejoramiento industrial, tecnológico y energético -MITE

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Buga, Colombia

Año 2020

Dedicatoria

Lleno de una gran alegría, satisfacción y orgullo quiero dedicar este trabajo de grado, realizado para obtener el título de Ingeniero Electromecánico, en primer lugar, a Dios por darme sabiduría y entendimiento durante este proceso. También, quiero dedicárselo a mis padres, esposa, hijos y hermanas por el apoyo y acompañamiento es este gratificante caminar, pues me siento orgulloso y es una satisfacción muy grande para mí el poder cumplir otra meta en mi vida.

Agradecimientos

Llegó el momento de culminar mi proceso de formación como profesional de Ingeniería Electromecánica, proceso que me enorgullece, es por ello, que quienes hicieron parte de este camino, y de este peldaño, de muchos venideros, quiero brindarles mi más sincero agradecimiento, pues fueron muchas las personas que durante la carrera me colaboraron directa e indirectamente, académicos y familia, entre ellos mi tutor de tesis, el Ingeniero Germán Ibarra, por el apoyo incondicional que me brindó durante el tiempo de elaboración del trabajo de grado, también, quiero agradecerle a la Institución, y personal docente, quienes fueron grandes portadores de conocimientos para mi formación. Por otra parte, a mi familia, en especial a mis padres Jesús Antonio y Rosa Elvira, mi esposa Diana Fernanda, mis hijos Valerie y Juan Alejandro y mi suegra Milena, por su ayuda durante el proceso de formación, en especial, durante el tiempo que invertí realizando mi proyecto de grado.

Resumen

Se presenta el diseño de un sistema undimotriz para aprovechar la densidad de potencia de 6.83 W/m en el Cabo de la Vela (Guajira, costa Caribe Colombiana). El sistema está compuesto por una boya de geometría cilíndrica y semiesférica (diámetro 1,86 m), un brazo articulado en viga tipo H para acoplar la boya a través de chapas soldada y soportar las cargas de flexión durante la captación de la energía; una turbina Pelton para una altura hidráulica estimada de 200 m netos y un caudal de entrada al tanque de 2 L/s; un cilindro hidráulico de 211 mm de diámetro, 191,4 mm de carrera, 500 mm de longitud y 44 mm de diámetro del vástago, para abastecer los 2 L/s requeridos a la entrada del tanque de presión; el tanque de presión de 5,5 gal de capacidad garantizara un caudal de salida del fluido de 1 l/s a 1,95 MPa de presión para entregarlos a la turbina para la generación de energía. La tubería seleccionada de 38,7 mm de diámetro en acero galvanizado permitirá interconectar los componentes del sistema, y por último un amortiguador hidroneumático de 3,4 Gal protegerá al sistema de diferentes problemas mecánicos. Este diseño se desarrolló para contribuir positivamente en el medio ambiente al disminuir las cifras de generación de energía con fuentes no renovables en Colombia, mediante la propuesta de una central undimotriz de 13000 kW de potencia eléctrica.

Palabras clave: Energías renovables, sistema undimotriz, diseño de máquinas, turbinas hidráulicas y generación de energía.

Abstract

This project presents the design of an indirect use of wave energy to harness the potential density of 6.83 W/m from Cabo de la Vela in La Guajira, on the Colombian Caribbean coast. The system consists on a 1.86 m diameter buoy (cylindrical and hemispherical shape); an articulated arm made of a H-type beam to couple the buoy by using a welded metal sheets to support the bending loads during operation; a 200 m (estimated) Pelton turbine; and a pressure tank of 2 L/s inflow; a 211 mm diameter hydraulic cylinder with 191.4 mm stroke, 500 mm rod length and 44 mm diameter to supply the fluid required flowrate at the inlet of the pressure tank; a 5.5 Gal pressure tank able to provide the turbine flowrate (1 L/s) at 1.95 MPa of pressure for energy generation. The selected pipeline has 38.7 mm diameter and is made of galvanized steel that connects the hydraulic components. Finally, the system includes a 3.4 Gal hydro-pneumatic damper to protect the system from overpressure from the hydraulic cylinder. This design was developed to contribute positively to the environment by reducing the figures for power generation with non-renewable sources in Colombia, through the proposal of a 13000-kW wave power plant.

Keywords: Renewable energy, wave system, machine design, hydraulic turbines, energy generation.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de símbolos y abreviaturas	XVII
1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	4
1.4. Alcance	5
1.5. Metodología.....	5
1.6. Organización de los capítulos.....	6
2. Marco teórico.....	7
2.1. Energía Undimotriz	7
2.2. Costas Colombianas.....	10
2.3. Selección del sistema Undimotriz a diseñar	13
2.4. Estado del Arte.....	15
3. Diseño del sistema undimotriz.....	26
3.1. Selección del lugar de instalación	26
3.2. Boya	28
3.3. Longitud y cálculo de las fuerzas del brazo	30
3.4. Cálculo de pasadores	39
3.5. Cálculos del sistema hidráulico.....	41
3.5.1. Selección de la turbina hidráulica y el generador	41
3.5.2. Cálculo del cilindro	44
3.5.2.1. Carrera y diámetro del vástago.....	45
3.5.2.2. Chequeo por pandeo.....	45
3.5.2.3. Diámetro del cilindro	47

3.5.3.	Selección del tanque	48
3.5.4.	Cálculo de la tubería y accesorios.....	49
3.5.5.	Cálculo de selección del amortiguador	51
4.	Análisis de resultados.....	53
4.1.	Sistema oscilante	53
4.1.1.	Boya.....	53
4.1.2.	Brazo.....	54
4.2.	Sistema hidráulico.....	54
4.2.1.	Turbina Pelton.....	55
4.2.2.	Cilindro hidráulico.....	55
4.2.3.	Tanque	55
5.	Conclusiones y Recomendaciones	56
5.1.	Conclusiones.....	56
5.2.	Recomendaciones.....	58
A.	Anexo: Sistemas undimotrices adicionales.....	60
	Central de energía Undimotriz en Escocia.....	60
	Central de energía Undimotriz en Noruega	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Mapa de potencial energético en Colombia.....	2
Figura 1-2: Metodología a seguir durante el desarrollo del proyecto.	5
Figura 2-1: Tipos de generadores de energía Undimotriz.....	8
Figura 2-2: Sistemas de captación de la energía mecánica de las olas.....	9
Figura 2-3: Sistemas según el tamaño y orientación de las olas.....	10
Figura 2-4: Costa Pacífica Colombiana.....	11
Figura 2-5: Costa Caribe Colombiana.....	12
Figura 2-6: Sistema Undimotriz de primera generación.....	13
Figura 2-7: Parque Undimotriz en Portugal.....	16
Figura 2-8: Central de energía eléctrica en Gibraltar.....	17
Figura 2-9: Sala de acumuladores y motores eléctricos.....	17
Figura 2-10: Central de energía eléctrica en Brasil.....	18
Figura 2-11: Máquina de energía Undimotriz de WAVESTAR.....	20
Figura 2-12: Proyecto de generación Undimotriz en Puerto Antofagasta.	21
Figura 2-13: Esquemas de Boyas.....	22
Figura 2-14: Valores promedio y variación estándar de potencia.....	22
Figura 2-15: Potencia promedio de las boyas pequeñas.....	24
Figura 2-16: Potencia promedio de las boyas medianas.....	24
Figura 2-17: Potencia promedio de las boyas grandes.....	25
Figura 3-1: Cabo de la Vela en la Guajira de la Costa Caribe Colombiana.....	27
Figura 3-2: Condiciones físicas del Cabo de la Vela.....	28
Figura 3-3 Centroides de la boya.....	30
Figura 3-4 boya y brazo mecánico.....	31
Figura 3-5 diagrama de momentos y cortantes en el brazo.....	34
Figura 3-6 Especificaciones de la viga tipo H.....	36
Figura 3-7 chapa para los extremos del brazo.....	37
Figura 3-8 Reacciones en el pasador.....	37
Figura 3-9 Angulo para el cálculo del vector resultante.....	38
Figura 3-10 Velocidades específicas para las turbinas.....	42
Figura 3-11 Selección de bomba hidráulica.....	42
Figura 3-12 turbina Pelton con generador modelo TP024.....	44
Figura 3-13 partes de un cilindro.....	45
Figura 3-14 Condicional para la constante de la columna.....	46
Figura 3-15 catálogo de tanque.....	49
Figura A-1: Central de energía Undimotriz en Escocia.....	61
Figura A-2: Central de energía Undimotriz en Noruega.....	62

Lista de tablas

Tabla 3-1: Condiciones físicas de la Costa Caribe Colombiana.....	27
Tabla 3-2 Cálculos de fuerzas, momentos y factores de seguridad del brazo	33
Tabla 3-3 Diámetro de la tubería	49
Tabla 3-4 coeficientes K.....	50

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI/FPS	Definición
D	-	m, mm	Diámetro
E	-	GPa	Modulo elasticidad
F	-	Newton	Fuerza
g	9,8	m/s ²	Gravedad
L	-	m, mm	longitud
P	-	Pa	Presión
Q	-	m/s	Caudal
T	-	S	periodo
V	-	m ³	Volumen
Fs	-	-	Factor de seguridad
Sy	-	Pa	Límite de fluencia
Se	-	MPa	Límite de resistencia a la fatiga
α	-	°C	Alpha
ρ	1025	kg/m ³	Densidad agua de mar
θ	-	°C	Theta
v	-	m/s	Velocidad

1. Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, la energía ha sido un recurso fundamental para su crecimiento y desarrollo tecnológico. En la actualidad, hacer frente a diversos desafíos y oportunidades en el sector energético, es de vital importancia para enfrentar la crisis energética y el calentamiento global que preocupan a la comunidad científica desde hace varias décadas.

Por otro lado, en el año 2014 el acceso a nuevas tecnologías y combustibles menos contaminantes aumentaron al 57,4%, un poco más del 56,5% registrado en 2012. Sin embargo, más de 3000 millones de personas (la mayoría de Asia y África), siguen siendo muy dependientes a los combustibles y a tecnologías poco eficientes y contaminantes. Afortunadamente en la última década, la situación ha ido mejorando gracias a la investigación y el aprovechamiento de energías renovables, tales como: la hidroeléctrica, solar y eólica (Naciones Unidas, 2019).

Trabajar en nuevos diseños de sistemas de ingeniería, enfocados principalmente en el ahorro y la eficiencia energética, así como también en la búsqueda de nuevas fuentes renovables de energía, es fundamental para seguir abasteciendo la creciente demanda mundial de energía eléctrica a los sectores socioeconómicos que lo requieran, y de esta manera, orientar los sistemas de generación eléctrica hacia una mayor confiabilidad y sostenibilidad mediante la explotación de las energías limpias.

Durante los últimos años, problemas puntuales asociados a las fuentes convencionales, como el incremento del coste del petróleo y el impacto medioambiental derivado de su explotación, han creado la oportunidad de innovar con nuevas tecnologías de generación de energía, que puedan ser adoptadas por los países en una escala mucho más amplia.

1.1. Planteamiento del problema

El calentamiento global, ocasionado en parte por las emisiones contaminantes de diferentes sistemas y sectores industriales, como por ejemplo la generación de potencia eléctrica basada en combustibles fósiles (debido a la combustión de los mismos), han incrementado las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a 37,1 giga toneladas al año (Planelle, 2018).

Actualmente, se genera energía eléctrica a través de fuentes renovables y no renovables. Entre las renovables están la hidráulica a pequeña escala, biomasa, eólica, solar térmica y fotovoltaica, que no afectan de forma tan grave al medio ambiente. Por el contrario, las no renovables incluyen la nuclear y termoeléctrica, que utilizan combustibles radioactivos o fósiles derivados del petróleo, gas, carbón y mezcla gas-jet A1 (Moriana, 2018). De acuerdo a un balance presentado por la presidenta de ACOLGEN Ángela Montoya Holguín, el balance de generación de energía en Colombia en el cual se aprecian las participaciones de 65,95% de energía hidráulica, 28,85% de energía térmica y 5,2% a partir de plantas menores y proyectos de cogeneración (Saavedra, 2018).

Figura 1-1: Mapa de potencial energético en Colombia.



Fuente: Osorio et al (2016).

1.2. Justificación

Teniendo en cuenta el impacto medio ambiental ocasionado por la generación de energía eléctrica con fuentes no renovables, es preciso incursionar en el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en energías limpias. En este caso a través de una propuesta de un sistema de generación Undimotriz, se pretende aprovechar que Colombia tiene 1300 km de extensión de costa Pacífica, y 1600 km de extensión de costa Atlántica, según Atlas geográfico de Colombia y universal (Gispert y Vidal, 1997).

Esto para emplear las energías potencial y cinética de las mareas, como fuente renovable de generación de energía eléctrica. Existen estudios que cuantifican el potencial en el Caribe entre 5 y 7 kW/m desde los meses de diciembre y abril, y en el Pacífico entre 3 y 4 kW/m durante todos los meses del año (Osorio, 2016), lo que representa una gran oportunidad para proyectar una central de respaldo durante el horario pico, que contribuya en la disminución del consumo y la dependencia a los combustibles fósiles.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de generación de energía a partir del aprovechamiento indirecto de las ondas superficiales del océano.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar el recurso disponible en las costas del país según la literatura.
- Determinar las especificaciones de diseño apropiadas según el recurso disponible y la energía generada.
- Definir y dimensionar los componentes del sistema de generación.
- Realizar la representación CAD del diseño y elaborar los planos generales del sistema.

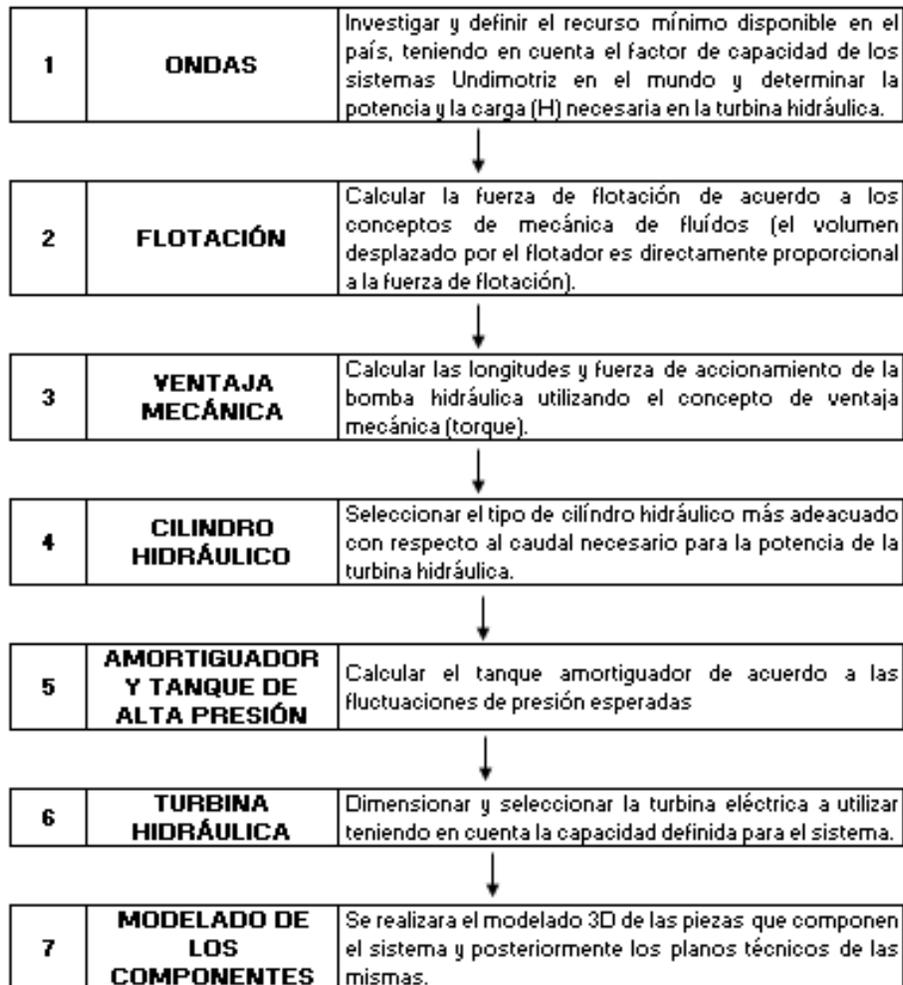
1.4. Alcance

Al final del proyecto se proporcionará las memorias de cálculo, los planos generales del sistema de las piezas a escala pequeña, para simular la generación.

1.5. Metodología

El diseño del sistema de generación de energía Undimotriz se compone de las siguientes actividades principales, las cuales se definieron a partir de los objetivos específicos y posteriormente se organizaron en el siguiente esquema:

Figura 1-2: Metodología a seguir durante el desarrollo del proyecto.



Fuente:

Elaboración

propia

1.6. Organización de los capítulos

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico con todos los conceptos necesarios para abordar el análisis de la energía undimotriz y el diseño del sistema. El capítulo 3 contiene el diseño y dimensionamiento de todos los componentes mecánicos e hidráulicos de la central undimotriz. El capítulo 4 presenta un análisis de los resultados en comparación con otros sistemas similares encontrados en la literatura. Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones recomendaciones y trabajos futuros. En el anexo se presenta otros tipos de sistemas undimotrices existentes (near-shore).

2. Marco teórico

A partir de las consultas realizadas sobre generación eléctrica mediante la energía Undimotriz, en este capítulo se presentará la información correspondiente, que sirvió como referencia para seleccionar y definir la mejor ubicación, tecnología y teoría académica específica para diseñar el sistema de aprovechamiento de energía Undimotriz en Colombia.

2.1. Energía Undimotriz

La energía undimotriz o también conocida como la energía de las olas presentó su primera patente en 1799 en Francia. Luego a principios de los años 70 aparecieron iniciativas financiadas por sociedades y gobiernos como los de Japón y reino unido. Este tipo de energía permite obtener electricidad por medio de la energía mecánica producto del movimiento ondulatorio de la superficie del agua del mar. En detalle el aumento de temperatura del área terrestre ocasiona viento y este abraza la capa superficial que se encarga de generar las olas, por tanto, de acuerdo a la cantidad, la fuerza, longitud y duración del viento, sobre la cual se transmite la energía que genera la ola, por lo que es una energía constante y predecible que contiene energía cinética y potencial la cual se transforma dependiendo del sistema de captación.

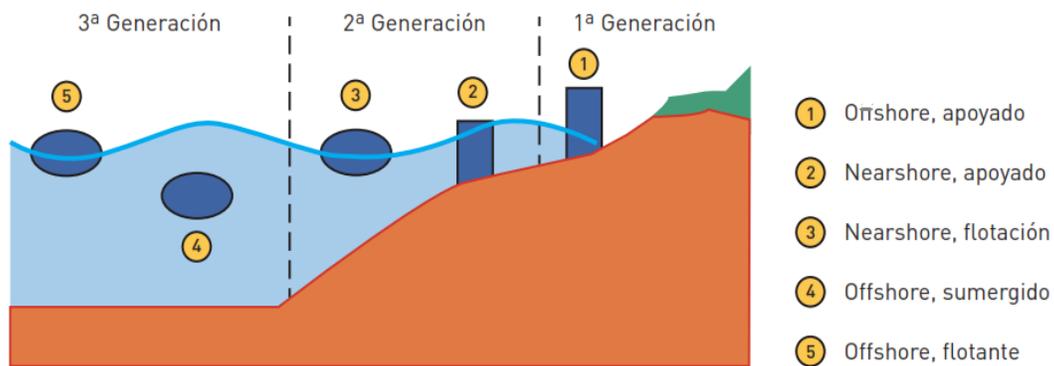
2.1.1. Tipos de sistemas generadores de energía Undimotriz.

- **Dispositivos de primera generación (on-shore):** son dispositivos que se encuentran ubicados en acantilados rocosos o sobre el fondo en aguas poco profundas.
- **Dispositivo de segunda generación (near-shore):** son dispositivos que se encuentran situados cerca de la costa en aguas poco profundas, entre 10 y 40

metros. Siendo una profundidad ideal para realizar instalaciones de estructuras flotantes o apoyados en el fondo del mar.

- **Dispositivos de tercera generación (off-shore):** son dispositivos ubicados lejos de las costas en profundidades entre 40 y 100 metros. En el cual se pueden ubicar estructuras flotantes o sumergidas.

Figura 2-1: Tipos de generadores de energía Undimotriz

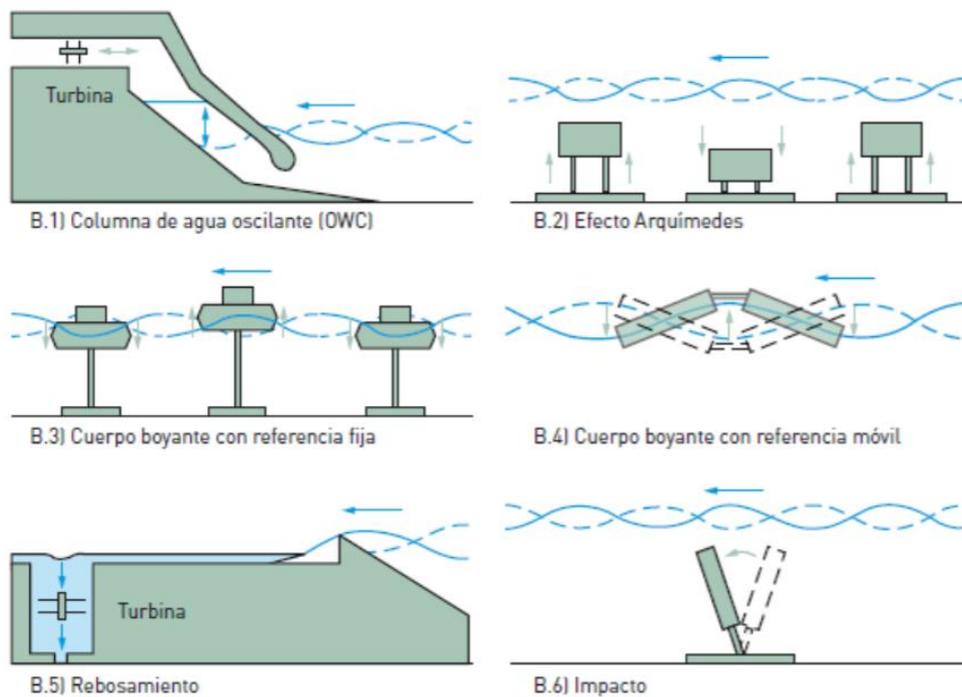


Fuente: IDEA (2011).

2.1.2. Clasificación de acuerdo al sistema de captación.

- **Cuerpos flotantes:** este tipo genera energía a partir de movimientos horizontales o verticales, sobre un eje que esta soportado a un punto fijo o también entre dos o varios elementos conectados entre sí.
- **Sistemas de derramamiento y/o choque:** en estos las oleadas golpean en las estructuras, aumentando la energía potencial, la energía cinética o ambas, los dispositivos de derramamiento obligan al agua sobrepasar las estructuras, mientras que los de choque se concentran en el impacto generado por las olas a las estructuras articuladas o flexibles para poder así captar del mejor potencial de energía.
- **Diferencia de presión en un fluido:** se basan en el comportamiento lineal de un fluido dependiendo de la presión ejercida, actualmente resaltan principalmente los siguientes: columna de agua oscilante (OWC) y de efecto Arquímedes.

Figura 2-2: Sistemas de captación de la energía mecánica de las olas



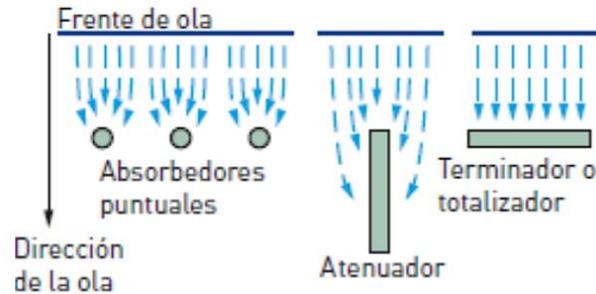
Fuente: IDEA (2011).

2.1.3. Clasificación de acuerdo al tamaño y orientación.

Como se ha descrito hasta ahora, existen varios tipos de sistemas de energía undimotriz. A continuación, se describen más en detalle.

- **Atenuadores:** Son elementos estructurales largos, instalados paralelamente y en sentido de avance de las olas, que extraen la energía progresivamente. Un ejemplo es el sistema Pelamis.
- **Totalizadores o terminadores:** Son dispositivos de forma alargada, ubicados perpendicularmente en dirección de avance de las olas, que captan la potencia mecánica. Ejemplo Rectificador Russell, Pato Salter.
- **Absorbedores puntuales:** son componentes estructurales pequeños comparados con la oleada, normalmente son cilíndricas e indiferentes al sentido de la ola. Comúnmente se sitúan diferentes aspiradores juntos de manera lineal. Ejemplos: tipo Boya.

Figura 2-3: Sistemas según el tamaño y orientación de las olas



Fuente: IDEA (2011).

2.2. Costas Colombianas

El territorio geográfico de Colombia tiene una superficie aproximada de 207.040.800 ha, donde 114.174.800 hacen referencia al área continental y 92.866.000 al área marítima las cuales se distribuyen específicamente en 33.930.000 en el Pacífico y 58.936.000 en el Caribe, situando al país como el 4to más extenso de Suramérica y el único con acceso a marítimo en ambos océanos. Por otro lado, la superficie continental se clasifica en cinco regiones naturales: Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquia y Amazonia (Banco de Occidente, 2002).

2.2.1. Costa Pacífica

Hace parte del Pacífico Oriental Tropical (Panamá Bight). Su extensión territorial es de 1.300 kilómetros y colinda con el istmo de Panamá a los 9° de latitud norte y en la punta Santa Helena, con Ecuador a los 2° de latitud sur. Sobre este océano tienen costa los departamentos del Valle del Cauca, Chocó, Cauca, Nariño y las islas de Gorgona, Gorgonilla y Malpelo, como se muestra en la Figura 2-4 (Ibarra, 2019).

El litoral Pacífico alberga directamente un océano abierto, con notable presencia de oleadas de 6 m, que varían cada 12 horas, alcanzando una altura máxima de olas de hasta 10 m. También la sismicidad en la zona es muy frecuente por causa del impacto entre las placas oceánica y continental. Entre sus principales características se pueden encontrar playas, acantilados, litorales, colinas, deltas fluviales, cordones litorales y

estribaciones de la cordillera Occidental Andina y de secuencias montañosas como la serranía del Baudó.

Figura 2-4: Costa Pacífica Colombiana



Fuente: Ibarra (2019).

En el litoral Pacífico es muy frecuente el surgimiento de tsunamis (marejadas de tipo sísmico), que ocasionan erosión afectando a una gran cantidad de asentamientos humanos (20% de la población aproximadamente). Las zonas más expuestas son los acantilados del norte, los cordones litorales, las playas en equilibrio como las de Nuquí, Panguí, El Valle, al sur de bahía Solano, Tumaco y los estuarios de la bahía de Buenaventura (Banco de Occidente, 2002).

2.2.2. Costa Caribe

La costa Caribe, tiene una extensión territorial de 1.600 kilómetros y está situada al norte del país. Colinda al occidente con Panamá, en el Cabo Tiburón a 18°4' de latitud norte y 77°18' de longitud oeste, en cuanto al este, colinda con Venezuela en punta Castilletes a 11°50'44" latitud norte y 71°19'20" longitud oeste. Entre los

departamentos que componen esta franja se encuentran Córdoba, Antioquia, Chocó, Sucre, Atlántico, Bolívar, Guajira, Magdalena, y el archipiélago de San Andrés y Providencia (Ver Figura 2-5).

Las corrientes y características de las áreas costeras y litorales presentan en la forma de interacción unas diferencias, convirtiendo ambientes diferentes en términos geológicos, morfológicos, climáticos, biológicos y socioeconómicos. Por el contrario, las mareas no superan los 60 cm en la región caribe, puesto que depende de una cuenca marítima con bajas profundidades, obteniendo olas de hasta 5 m de altura. La plataforma continental colombiana arriba del Caribe puede llegar hasta profundidades entre los 130 y 150 metros, donde rápidamente cambia la pendiente y la inclinación se lanza hacia la Cuenca de Colombia (Comité editorial banco de Occidente, 2002)

Figura 2-5: Costa Caribe Colombiana



Fuente: Ibarra M (2019).

Esta plataforma tiene un ancho variable que alcanza 70 kilómetros frente al departamento de Córdoba y próximo a los 40 kilómetros en el golfo de Morrosquillo y frente a la península de La Guajira. El Caribe colombiano está compuesto de diversos

ecosistemas, como: litorales rocosos, acantilados, formaciones basálticas y sedimentarias.

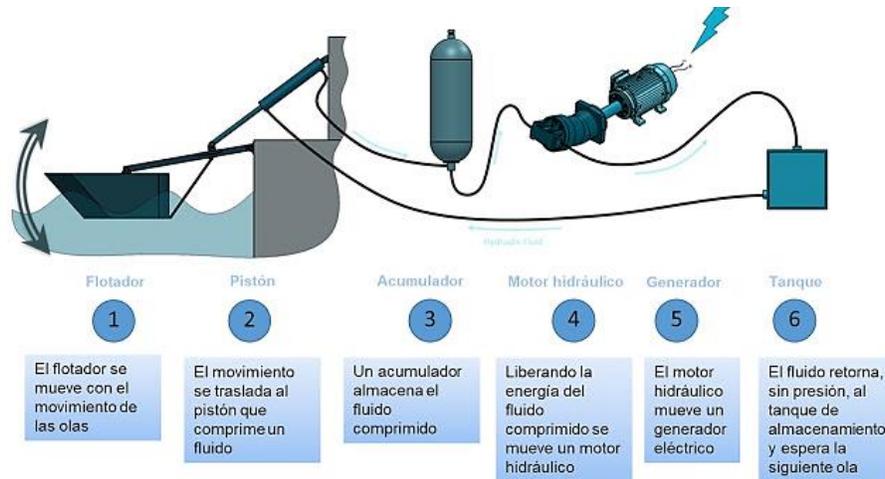
Por otro lado el 65% del litoral Caribe se compone en gran parte por playas arenosas, compuestas por sedimentos de origen fluvial, playas areno-fangosas de granulometría fina y granulometría media a gruesa (Banco de Occidente, 2002).

2.3. Selección del sistema Undimotriz a diseñar

Se toma como referencia el de primera generación (on-shore, ver Figura 2-6), ya que tiene grandes ventajas como, por ejemplo: la sencillez de montaje, ausencia de ataduras, mantenimiento económico, alta vida útil y menores pérdidas por su cercanía con la costa durante el transporte e integración de la energía producida. Sin embargo, su implementación presenta desventajas por los pocos sitios potenciales, baja potencia de las olas y su impacto medioambiental y visual (Más que Máquinas Agrícolas, 2019).

Puntualmente la tecnología a utilizar será similar a la central de Gibraltar, desarrollado por la empresa Eco Wave Power. Esta tecnología es de menor costo que las near-shore a pesar de que el potencial es mayor lejos de la costa. Los sistemas on-shore tienen la ventaja del acceso por carretera, están compuestos por módulos “rompeolas” individuales que se anclan a una estructura, lo que reduce el impacto ambiental. Sin embargo, la ola necesaria para producir energía debe ser mayor a 0,5 m. (tampoco un mar turbulento es eficiente para la producción, ya que pondría en riesgo el sistema). Lo ideal son olas de 1,5 m para llevar a cabo la generación de electricidad.

Figura 2-6: Sistema Undimotriz de primera generación



Fuente: Más que Máquinas Agrícolas (2019).

Con el sistema seleccionado el aprovechamiento de la energía Undimotriz se efectúa a través de un funcionamiento bastante sencillo que consiste en lo siguiente:

- Los flotadores extraen la energía mecánica de las olas a partir del movimiento ascendente y descendente de las mismas.
- El movimiento genera unas variaciones de presión que permiten comprimir y expandir los pistones de los cilindros hidráulicos.
- Luego la presión ejercida sobre el fluido se usa para hacer girar un motor hidráulico acoplado a un generador eléctrico.
- Posteriormente la energía se acumula en tierra para ser transferida a la red por medio de un inversor.

En caso de que se requiera aumentar la capacidad del sistema, al ser este modular, se tendrían que ir añadiendo módulos proporcionalmente a la potencia adicional que se necesita aumentar. Los componentes del sistema de primera generación (on-shore) se describen a continuación.

- **Flotador o Boya (módulos):** será el componente actuador que interactuará con las olas para capturar y posteriormente poder aprovechar la energía mecánica (cinética y potencial) contenida en las mismas (Eco Inventos, 2014).
- **Brazo articulado:** es el componente que estará fijado en la costa y al que se acoplará la boya, permitiéndole efectuar movimientos en las direcciones que se

requieran (verticales, horizontales o ambas) y posteriormente permitir el accionamiento de la bomba.

- **Cilindro Hidráulico:** será el actuador mecánico que se utilizará para proporcionar la fuerza a través de un recorrido lineal, que se requiere para generar la presión en el fluido que le permitirá mover la turbina hidráulica. (Hidráulica y Neumática, 2019).
- **Amortiguador de pulsaciones** este componente es instalado después de la salida del cilindro hidráulico para ayudar a evitar daños al sistema eliminando los choques del sistema de flujo, reduciendo las fluctuaciones de presión que se producen normalmente (Hidráulica y Neumática, 2019).
- **Tanque acumulador de presión hidroneumático:** es el componente que almacenará el agua inyectada por la bomba para posteriormente entregar el agua según un rango de presión, mantener un flujo constante de agua en el sistema y evitar así pérdidas de presión y reducir al mínimo los golpes de ariete (Health, 2011).
- **Turbina hidráulica:** será la máquina que transformará la energía mecánica contenida en el fluido (cinética y potencial) en energía mecánica de rotación y en donde se acoplará el generador eléctrico (Eco Inventos, 2014).
- **Generador eléctrico:** esta máquina que estará acoplada a la turbina hidráulica será la encargada de convertir la energía mecánica de rotación proveniente de la turbina hidráulica en energía eléctrica para consumo (Eco Inventos, 2014).
- **Válvulas:** son elementos de control que permitirán regular el flujo, avance o retroceso del fluido dentro del sistema (RAE, 2019).
- **Tuberías:** serán los elementos por donde circulará el flujo y que permitirán que el agua impulsada desde la bomba llegue hasta la turbina (RAE, 2019).

2.4. Estado del Arte

El objetivo de aprovechar la potencia de las olas no es reciente. Las anteriores patentes se registraron en París, durante la Revolución Francesa, por un padre e hijo de apellido Girard. Sin embargo, esta tecnología no comenzó a aprovecharse hasta finales del siglo XX (muerza, 2008). De esta forma, los profesionales en el tema enlistan hasta 81 propuestas diferentes, de las cuales hay varias operando en diferentes sitios del planeta.

Por ejemplo, está el caso de Portugal que frente a la localidad norteña de Póvoa de Varzim, inauguró una central Undimotriz, denominada Okeanós, el cual abastece a la red eléctrica con tres sistemas Pelamis con posibilidad de generación de 2,25 MW. De igual manera dispone de una factoría que aprovecha una columna de agua oscilante en la isla de Pico, en las Azores (muerza, 2008). Actualmente existen algunas centrales que generan electricidad a partir del aprovechamiento de la energía Undimotriz, de las cuales se destacan algunas como las que describen a continuación.

Figura 2-7: Parque Undimotriz en Portugal



Fuente: Muerza (2008).

2.4.1. Central de energía Undimotriz en Gibraltar

La empresa israelí Eco Wave Power (EWP) patrocinada por el fondo europeo de desarrollo regional (2014-2020). Desde el año 2016 está operando la primera estación de energía Undimotriz en el muelle de municiones, situado al este de Gibraltar. La capacidad instalada actual de la estación es de 100kW, pero con una proyección a futuro de 5 MW, abasteciendo por el momento el 15% de las necesidades energéticas de Gibraltar. El sistema se basa en el tipo de primera generación y se compone de 8 flotadores unidos a estructuras marinas preexistentes construidas a través de brazos mecánicos robustos y una estación de control ubicada en el muelle (Rudick, 2018).

Algunas fuentes exponen que el costo de la generación de energía eléctrica con este sistema, es más favorable que con la energía eólica y similar a la energía solar.

Figura 2-8: Central de energía eléctrica en Gibraltar



Fuente: Rudick (2018).

Figura 2-9: Sala de acumuladores y motores eléctricos



Fuente: Más que Máquinas Agrícolas (2019).

2.4.2. Central de Pecém, Brasil

El proyecto, pionero en América Latina, estuvo a cargo del Instituto Alberto Luiz Coímbra de Posgrado e Investigación de Ingeniería (Coppe), que hace parte de la

Universidad Federal de Rio de Janeiro, y apoyado económicamente por Tractebel, además de contar con el apoyo del gobierno del Estado de Ceará (Eco Inventos, 2014).

Su ubicación para el montaje del sistema primordialmente se escogió por la presencia de los vientos alisios, que ocasionan el oleaje en el mar Cearense, aunque les falta amplitudes elevadas, son muy frecuentes, característica que incrementa la eficiencia de la instalación. Durante su periodo de ensayos se proyectó que podría iniciar su operación definitiva cuando generara 100 kilowatts para satisfacer la demanda energética del puerto Cearense y beneficiando a 60 familias aproximadamente.

Figura 2-10: Central de energía eléctrica en Brasil



Fuente: Eco Inventos (2014).

La central se diseñó con base en el tipo de primera generación y está compuesta por brazos mecánicos acoplados al muelle del Puerto de Pecém. El extremo de esos brazos, en contacto con la marea, tiene una boya circular que, con el flujo del oleaje, generan un movimiento en ascenso y descenso activando bombas hidráulicas, que causan que el agua dulce de un circuito cerrado (donde no hay intercambio con el ambiente), fluya a través de una red de alta presión. El fluido a presión alta fluye hacia un tanque de agua y aire comprimidos en una cámara hiperbárica, que abastecen al dispositivo.

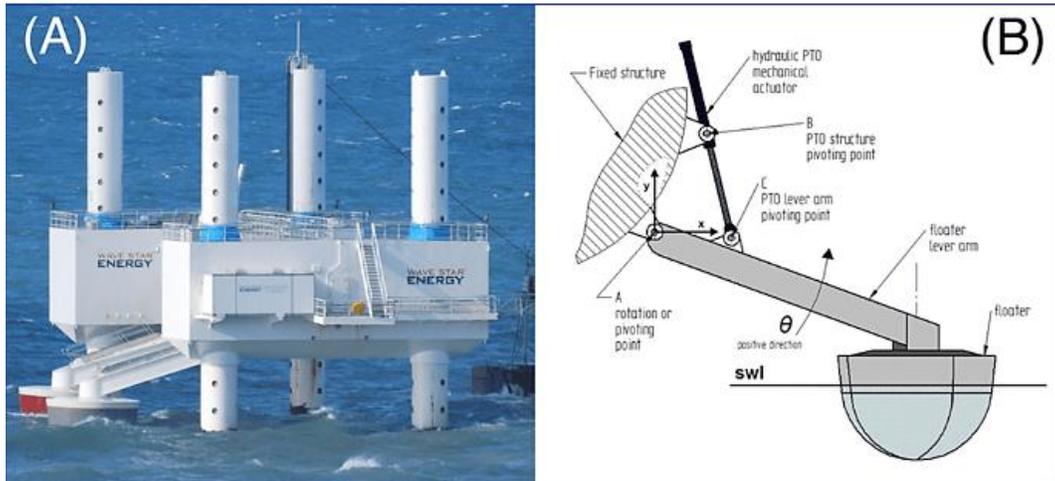
2.4.3. WAVESTAR

Fue inventado por los Experimentados de la navegación Niels y Keld Hansen en el año 2000. La idea inicial consistía en generar energía a partir de las olas del océano entre intervalos de 5 a 10 segundos. Posteriormente se logró a través de la instalación de una fila de boyas medio sumergidas, las cuales ascendían y descendían a medida del desplazamiento de la ola, formando la parte icónica del diseño de WAVESTAR y permitiendo que se produzca energía continuamente sin importar que las ondas son periódicas.

La máquina tiene un exclusivo sistema de protección contra tormentas, garantizando la supervivencia de la misma en el mar y representando un hito real en el desarrollo de máquinas de energía Undimotriz. Por otro lado, WAVESTAR en sus diseños incluye otros métodos de energía limpia para complementar con el uso de energía alternativa y garantizar así, un suministro continuo de energía limpia (WAVESTAR, 2019). WAVESTAR funciona al extraer la energía mecánica de las olas con 20

flotadores que ascienden y descienden con el desplazamiento de las olas hacia arriba y hacia abajo.

Figura 2-11: Máquina de energía Undimotriz de WAVESTAR



Fuente: WAVESTAR (2019).

Los flotadores están acoplados a brazos instalados sobre una plataforma que se apoya sobre estructuras aseguradas en el fondo del mar. Luego el movimiento de los flotadores se transfiere por vía hidráulica para hacer rotar un generador, con el cual se producirá la energía. Alimentar el motor y el generador de esta manera permite la producción continua de energía y una salida suave.

2.4.4. Proyecto en Puerto Antofagasta

En colaboración de la Universidad Católica del Norte, (UCN) y la organización Portuaria de Antofagasta (EPA), este proyecto denominado como WaraQocha (Lucero del Mar) busca obtener electricidad a partir del aprovechamiento de la energía del oleaje en el borde costero y la cual se utilizará principalmente una vez transformada, para mantener el funcionamiento del faro. Así, WaraQocha busca emprender apuntando al funcionamiento de una central innovadora de tipo semi-industrial, en el sector costero, puntualmente en función del Puerto de Antofagasta (Región2.CL, 2019).

Figura 2-12: Proyecto de generación Undimotriz en Puerto Antofagasta.

Fuente: Región2 (2019).

La propuesta del proyecto incluye un mecanismo con un brazo de 15 m de longitud, el cual está ajustado a una boya cónica circular de fondo plano cuyo diámetro varía entre los 4,2 y 2,5 m. Esta instalación varía con respecto a la potencia de las olas, y se acopla a un pistón que inyecta el fluido en el tanque hiperbárico, donde la presión máxima de trabajo se ajusta a 12 bar. Posteriormente, el fluido es dirigido hacia una turbina para hacerla girar y producir electricidad. Por último, el fluido después de ser liberado, retornará al sistema para iniciar de nuevo el ciclo. La capacidad de producción del sistema, dependerá del oleaje.

2.4.5. Flotación y estabilidad

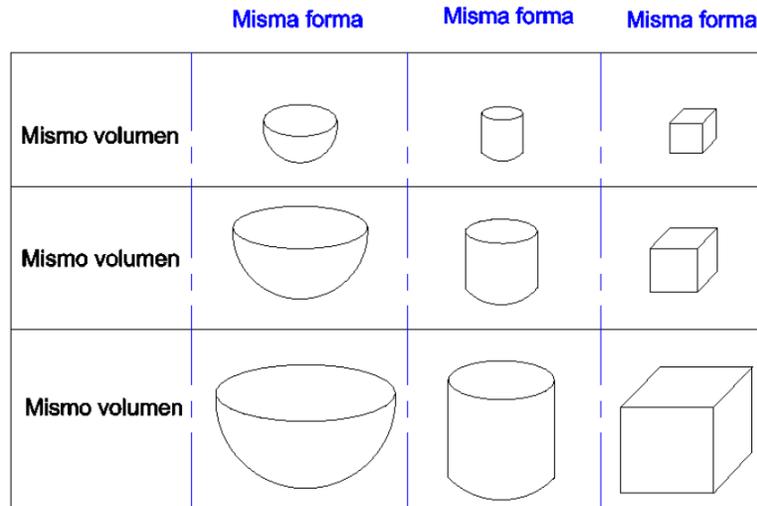
La fuerza de flotación es aquella que se produce y actúa perpendicularmente en dirección contraria sobre un cuerpo cuando este se sumerge en un fluido, ocasionando una resistencia a que el cuerpo se sumerja y empujándolo nuevamente a la superficie (Çengel, 2006).

$$F_B - W = 0 \quad (2-1)$$

La forma geométrica de la boya es una variable muy importante a considerar en el diseño de la misma, debido a que de esta dependerá principalmente la producción de potencia. Un estudio sobre este punto fue realizado en la Universidad de Chile. Se

evaluaron numéricamente 9 boyas, siendo de tres geometrías diferentes (semiesferas, cilindros, cubos), cada una con tres tamaños (ver figura 2-13). Esto teniendo en cuenta la posición y la masa agregada para cada diseño (Gallardo, 2017).

Figura 2-13: Esquemas de Boyas

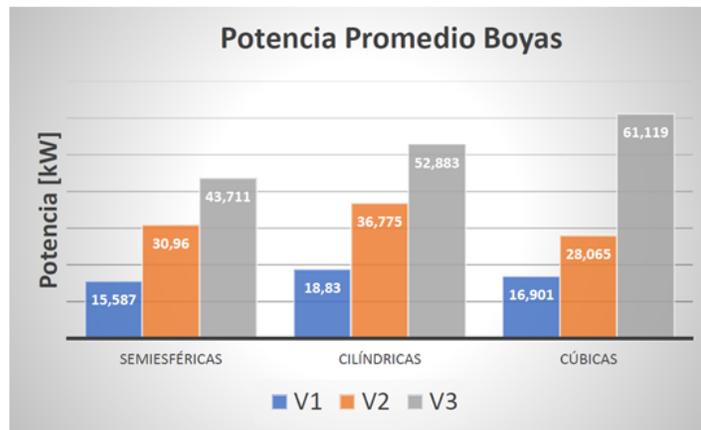


Fuente: Gallardo (2017).

- Boyas Semiesféricas:** En los resultados obtenidos en las simulaciones de las boyas semiesféricas con 3 tamaños distintos, se observa que la boya esférica 1 presenta un promedio de potencia de 15.587 kW y un promedio de potencia por periodo de 15.535 kW, en cuanto a la boya esférica 2, presenta una potencia promedio de 30,960 kW y 30.695 kW, mientras que la boya esférica 3, 43.711 kW y 43.357 kW respectivamente. Por otro lado, la potencia por periodo es más irregular en la boya con mayor volumen y la mayoría de las veces esta es mayor (ver figura 2-14).

Figura 2-14: Valores promedio y variación estándar de potencia

	Semiesfera1	Semiesfera2	Semiesfera3
PpromTotal [kW]	15,587	30,96	43,711
PpromPeriodo [kW]	15,535	30,695	43,357
Desviación Estandar	2,41	3,355	10,71
	Cilindro1	Cilindro2	Cilindro3
PpromTotal [kW]	18,83	36,775	52,883
PpromPeriodo [kW]	18,811	36,532	52,483
Desviación Estandar	2,83	5,839	12,61
	Cubo1	Cubo2	Cubo3
PpromTotal [kW]	16,901	28,065	61,119
PpromPeriodo [kW]	16,773	27,85	60,73
Desviación Estandar	1,636	5,022	10,4



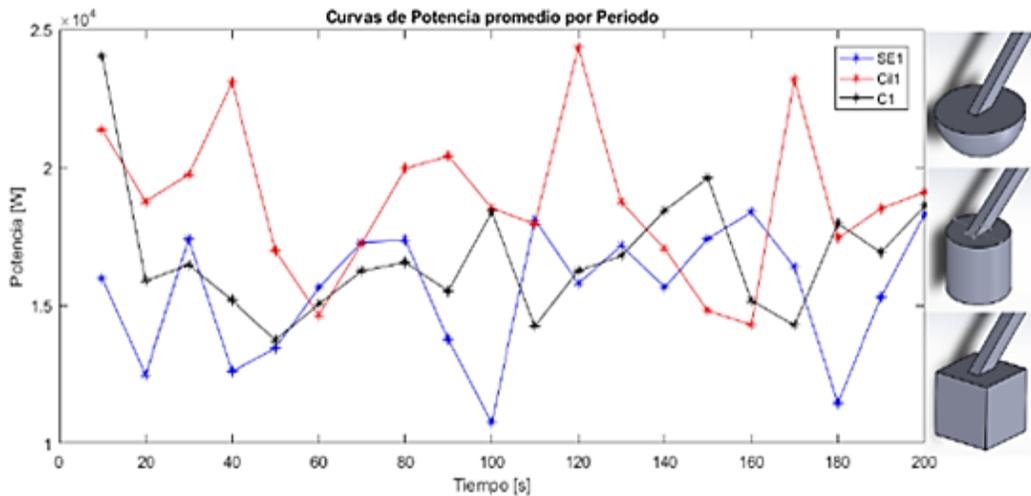
Fuente: Gallardo (2017).

- Boyas Cilíndricas:** En los 3 tamaños de las boyas cilíndricas, la boya cilíndrica 1 tiene una potencia promedio de 18.83 kW y una potencia por periodo promedio de 18.811 kW, en cuanto a la boya cilíndrica 2, tiene valores de 36.775 kW y 36.532 kW, mientras que la boya cilíndrica 3 de 52.883 kW y 52.483 kW para cada caso. De igual manera que con las boyas semiesféricas, las boyas más pequeñas presentan fluctuaciones de potencia promedio mucho menores que la boya cilíndrica de mayor volumen. En la boya 1 y 2 se puede ver que la potencia por periodo se mantiene relativamente constante, mientras que en la boya tres se presentan ciertas irregularidades a los 90 segundos y a los 170 segundos.
- Boyas Cúbicas:** Por último, en las boyas de geometría cubica, la potencia promedio de la boya cúbica 1 es 16.901 kW y la potencia por periodo promedio de 16.773

kW, para la boya cúbica 2 los valores son 28.065 kW y 27.859 kW, mientras que para la boya cúbica 3 son 61.119 kW y 60.730 kW respectivamente. A diferencia de las otras boyas, el comportamiento del movimiento de la boya cúbica, presenta curvas de potencia en los tres volúmenes de boya cúbica estables y con un comportamiento similar durante los 200 segundos simulados. Por otro lado, los valores de potencia por periodo no fluctúan demasiado después de los 20 segundos.

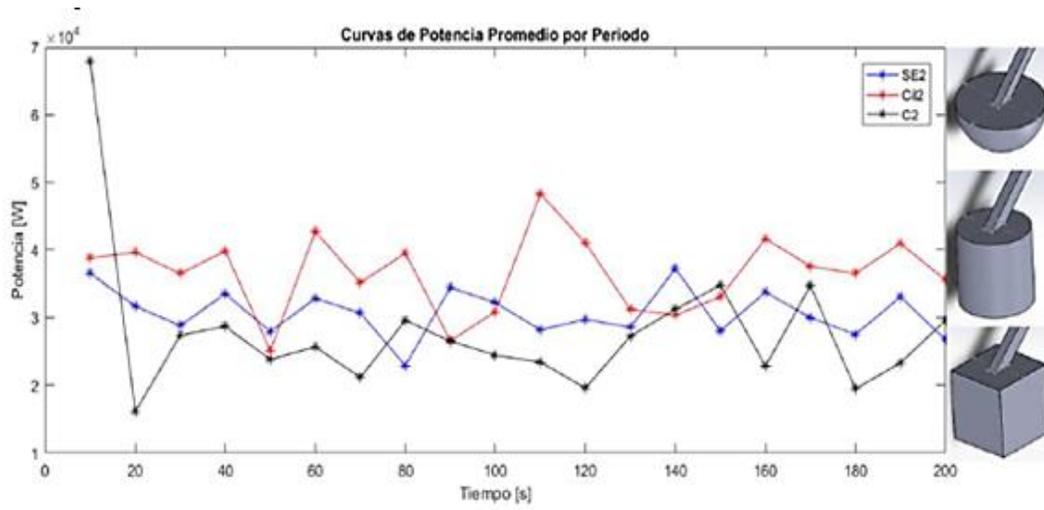
Con los resultados del análisis numérico, se observa que a medida que incrementa el volumen de las boyas, la desviación estándar de los resultados también aumenta. Esto es, las boyas cilíndricas son las que presentan la mayor desviación en todos los volúmenes evaluados (ver figuras 2-15 a 2-17).

Figura 2-15: Potencia promedio de las boyas pequeñas.



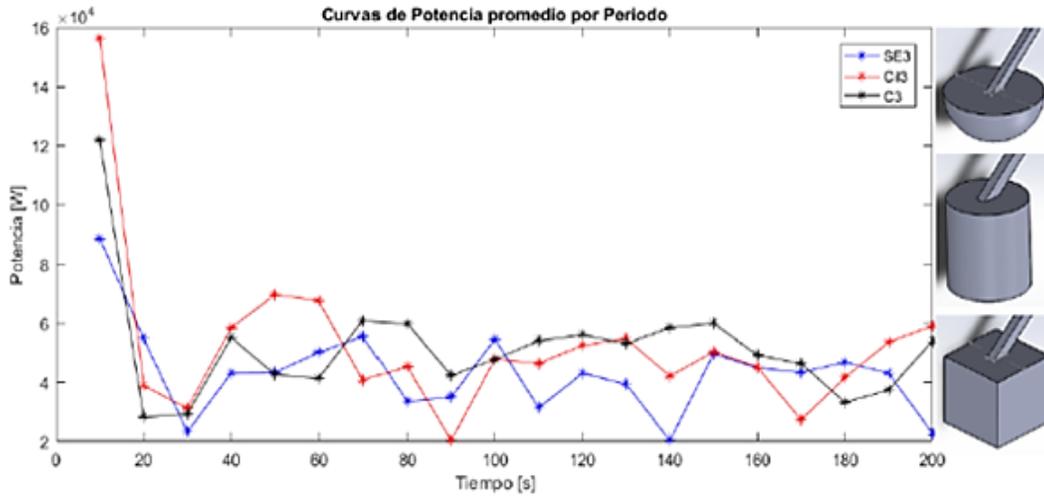
Fuente: Gallardo (2017).

Figura 2-16: Potencia promedio de las boyas medianas.



Fuente: Gallardo (2017).

Figura 2-17: Potencia promedio de las boyas grandes.



Fuente: Gallardo (2017).

3. Diseño del sistema undimotriz

En el presente capítulo se iniciará el diseño del sistema de aprovechamiento indirecto de energía undimotriz, por lo que se desarrollarán cálculos de ingeniería que permitirán definir y especificar las características a tener en cuenta para la fabricación o selección comercial de los principales componentes requeridos en el sistema (sección 2.3).

3.1. Selección del lugar de instalación

Se obtuvieron datos de densidad de potencia (W/m) en ambas costas del país, evidenciando que en la costa Atlántica las condiciones son más favorables (Osorio et al, 2011). Luego, para determinar el lugar para efectos de la realización de este trabajo, se solicitaron datos más detallados que fueron suministrados por personal del grupo de investigación en oceanografía e ingeniería costera (OCEANICOS) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. (Tabla 3-1). Las coordenadas resaltadas en negrilla fueron las seleccionadas debido a la cercanía a la costa y al tipo de sistema a diseñar.

Los datos corresponden a mediciones y cálculos de períodos y alturas de onda para varios lugares a lo largo de la costa Atlántica y lugares en altamar. Se puede observar que la densidad de potencia en W/m es mayor para las coordenadas que corresponden a un lugar cercano al Cabo de la Vela. Debido a que el sistema de generación undimotriz diseñado en este trabajo es de primera generación de tipo on-shore (Figura 3-1), la selección del lugar se restringió a las mediciones en lugares sobre la costa Atlántica. El valor máximo correspondió a las coordenadas 71.500W-12.550N, también cercanas al Cabo de la Vela.

Las coordenadas fueron ingresadas en Google Maps para obtener la ubicación del lugar seleccionado, el cual muestra el equivalente en coordenadas de latitud y longitud (Figura 3-2). Para contrastar la información suministrada, se consultó el sitio en Internet 'wisuki' que suministra previsión de olas, mareas, viento y temperatura para varios lugares en el mundo. Nótese que, para el período consultado, la marea alcanza tres ciclos completos donde la altura H_s tiene órdenes similares -aunque inferiores a lo medido directamente por el grupo OCEANICOS. Para el diseño, las mediciones del grupo fueron las seleccionadas por tratarse de valores determinados directamente in situ.

Tabla 3-1: Condiciones físicas de la Costa Caribe Colombiana

Departamento	Localización	Altura de onda (50%) H_s [m]	Período medio T_s [s]	Potencia [W/m]
Córdoba	76.750W-9.000N	1,18	6,43	4.39
Córdoba	76.450W-9.350N	1,18	6,45	4.40
Atlántico	75.550W-10.900N	1,90	7,1	12.56
Atlántico	75.550W-10.700N	1,95	6,95	12.95
Atlántico	74.150W-11.450N	1,8	7,04	11.18
Atlántico	73.950W-11.450N	1,67	6,91	9.44
La Guajira	73.650W-11.400N	1,46	6,69	6.99
La Guajira	71.500W-12.550N *	1,42	6,91	6.83
La Guajira	72,050W-12.400N	1,5	6,87	7.57
La Guajira	71.800W-12.500N	1,3	6,87	5.69
* Corresponde al Cabo de la Vela				

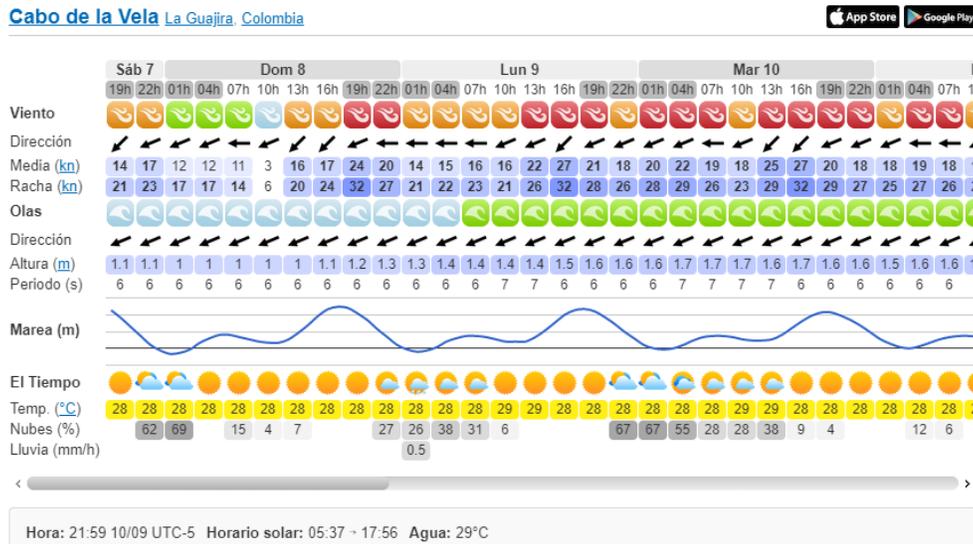
Fuente: Osorio A (2019).

Figura 3-1: Cabo de la Vela en la Guajira de la Costa Caribe Colombiana



Fuente: Google Maps (2019).

Figura 3-2: Condiciones físicas del Cabo de la Vela



Fuente: Wisuki (2019).

3.2. Boya

Primero se determina la fuerza de flotación ejercida sobre la boya aplicando la ecuación (3-2). En este caso, el volumen de agua desplazado por el flotador se puede determinar una vez se seleccione el tipo y dimensiones del flotador.

$$F_B = W \tag{3-1}$$

$$F_B = \rho g V_d = 42032,6 \text{ N} \tag{3-2}$$

Donde F_B es la fuerza de flotación, V_d es el volumen sumergido (volumen de agua desplazado por el flotador), ρ es la densidad del agua de mar y g es la aceleración de la gravedad. Por su parte, el volumen desplazado corresponde al volumen de un cilindro y una semiesférico con diámetro (D) igual a 1,86 m y una altura sumergida de 0,3 m:

$$V_d = \left[\left(\frac{\pi}{4} D^2 H \right) + \left(\frac{\pi}{6} D^3 \right) \right] = 4,2 \text{ m}^3$$

El valor del radio se iteró para que la fuerza de flotación generara una presión suficiente en el cilindro-bomba por encima de lo requerido a la entrada de la turbina. Las características de fabricación de la boya serán evaluadas con el proveedor de acuerdo a los materiales más acordes encontrados en la literatura (estructura metálica y placa de polipropileno de placas cerradas) y avalados por la norma ISO 1461, 12944. Donde recomiendan ser construidas en la parte por una estructura metálica, y en la parte externa una placa de polietileno de celdas cerradas con un calibre no inferior a 10 mm. Se selecciona este tipo de material debido a su alta resistencia a los impactos baja posibilidad de corrosión y densidades ideales para la flotación.

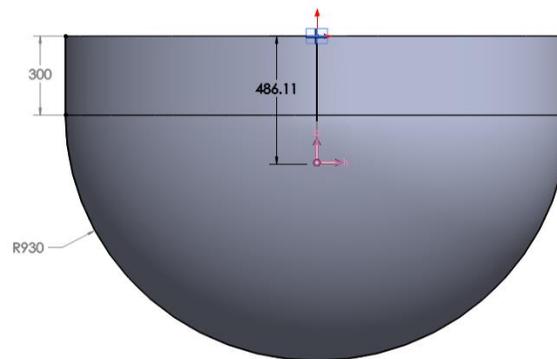
Por otro lado en una publicación (Wavestar Energy, 2004) se expone que la eficiencia del aparato con respecto a la inmersión se incrementa con la flotabilidad de la boya con base a su peso en seco (300 kgf). Por consiguiente, en aplicaciones, la flotabilidad del flotador generalmente es al menos 10 veces su peso seco, al igual que 20, 30 o 50 veces (preferiblemente entre 20 y 40 veces), es decir, si el peso típico de un flotador es de 100 kg/m³ de flotabilidad, la flotabilidad del agua salada sería aproximadamente 1027 kg/m³. Una vez se defina la estructura del brazo se debe de considerar para recalcular la fuerza de flotación.

En cuanto a los materiales para fabricar flotadores, normalmente se utiliza espuma dura de bajo peso o madera de balsa recubiertos por algún compuesto de fibra de vidrio reforzada o una combinación de fibra de vidrio y fibra de carbono. Así, un flotador podría fabricarse a partir capas de material en fibra reforzada con espuma

dura en medio de dos capas (arriba y abajo) separadas por una estructura de panel de refuerzo. También debe tenerse en cuenta durante el diseño del flotador, que la eficiencia incrementa proporcionalmente al diametro del flotador en relación a la altura, es decir, el diametro del flotador debe ser al menos entre 5 y 20 veces a su altura y debe presentar una sección transversal preferiblemente circular y bordes redondeados que actuen como una linea de flujo que le mejoren las propiedades dinámicas del fluido del flotador.

Se seleccionará para el diseño del flotador una forma de cilindro con una semiesfera, para garantizar un mejor comportamiento sin importar la dirección por donde llegue la ola a el flotador. Las fuerzas y el movimiento actuarán de la misma forma. Fabricado con materiales avalados por las normas establecidas a nivel nacional e internacional para garantizar un bajo impacto ambiental. Entre estas normas existentes a nivel nacional esta la resolución 771 de 2011 que habla de las especificaciones técnicas para las boyas o ayudas flotantes especiales, utilizadas en jurisdicción de la Dirección General Marítima colombiana. (Duran, 2011).

Figura 3-3 Centroide de la boya



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Longitud y cálculo de las fuerzas del brazo

De acuerdo a la literatura se analizaron varias formas para el diseño del brazo y se selecciona la viga tipo H debido a la inercia que alcanza a tener por el diseño de sus alas. Siendo esta una justificación para su selección. No se quiere decir que sea la única que pueda ser seleccionada porque para ello es necesario realizar un estudio más

avanzado mediante software de las fuerzas que serán ejercidas por las olas durante su operación

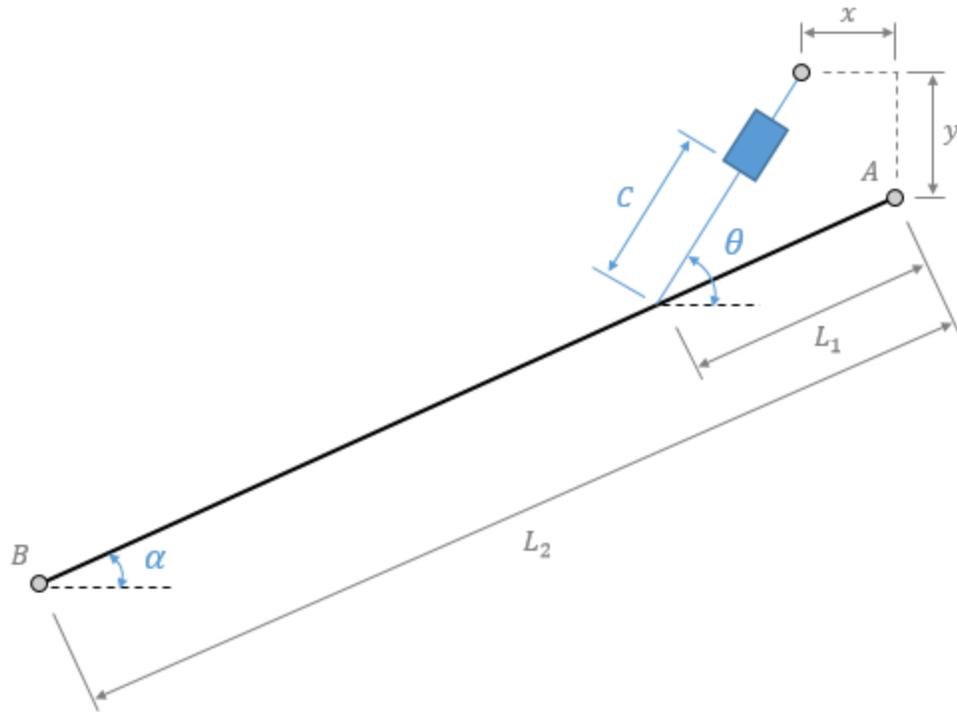
Para el sistema undimotriz de boya fluctuante, se requiere un brazo apoyado sobre una superficie fija. Para analizar la ventaja mecánica que es posible obtener en una configuración de este tipo, se plateó el siguiente esquema.

Es muy importante tener en cuenta la fuerza que ejerce el agua para hacer subir el sistema y calcular la cantidad de energía que se puede generar. Teniendo en cuenta que en la ubicación se pueden generar 6,8 kW/m de frente de onda y tenemos una boya de 1,86 m de diámetro podemos decir que el sistema nos puede entregar una potencia 12648 kW debido a esto se puede decir que la fuerza (F_{agua}) que ejercerá el agua se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_{\text{agua}} = \frac{P}{\frac{x}{t}} = 29\,838,6\,N \quad (3-3)$$

Donde P es la potencia generada por la onda y la boya, x es la altura de la ola, y t es el tiempo que se demora en subir la ola.

Figura 3-4 boya y brazo mecánico



Fuente: Elaboración propia

Para hallar la longitud y fuerza del brazo, se seleccionaron 2 ángulos que permitieran garantizar una ventaja mecánica de al menos 7,2, según la gráfica realizada para la combinación de ángulos en el brazo cuando se encuentra en la posición superior ($\theta = 39,94^\circ$ y $\alpha = 11,54^\circ$) y la posición inferior ($\theta = 60^\circ$ y $\alpha = 37,28^\circ$). En este caso se aplicó la ecuación de sumatoria de momentos igual a cero para calcular las fuerzas que ejercerá el cilindro en esas posiciones del flotador.

$$-F_{agua} L_1(\cos\alpha) - F_c(\cos\theta)L_2(\sen\alpha) + F_c(\sen\theta)L_2(\cos\alpha) = 0 \quad (3-4)$$

$$F_c = F_{agua} \frac{L_1}{L_2} \left[\frac{\cos(\alpha)}{\sen(\theta) * \cos(\alpha) - \cos(\theta) \sen(\alpha)} \right] \quad (3-5)$$

Siendo F_c la fuerza que ejercerá el cilindro cuando el flotador está en la posición inferior:

$$F_{c1} = 215151,2 \text{ N}$$

Por otro lado, la relación de las fuerzas del cilindro en la posición baja y la fuerza de flotación se calcula a través de la siguiente ecuación.

$$\frac{F_{C1}}{F_{agua}} = \frac{215151,2 \text{ N}}{29838,6 \text{ N}} = 7,2 \quad (3-6)$$

Este resultado dependió de asignar iterativamente las longitudes $L_1 = 3.5 \text{ m}$ y $L_2 = 1.0 \text{ m}$ Luego aplicando los mismos procedimientos para calcular la fuerza del cilindro en la posición baja y la relación de fuerzas tenemos que la fuerza que ejercerá el cilindro cuando el flotador está en la posición superior y la relación de fuerzas en la misma posición son:

$$F_{C2} = 215136,1 \text{ N}$$

$$\frac{F_{C2}}{F_{agua}} = \frac{215136,1 \text{ N}}{29838,6 \text{ N}} = 7,2$$

Donde F_{C1} es la fuerza del cilindro en la parte baja, F_{C2} es la fuerza del cilindro en la parte alta, L_1 es la longitud del brazo, L_2 es el punto de conexión del vástago del cilindro, θ es el ángulo que forma el vástago de acuerdo la posición en la que se encuentre, α es el ángulo que forma el brazo de acuerdo de la posición en la que se encuentre.

Con respecto a la sección transversal del brazo, se realizó un análisis de diferentes perfiles estructurales. Se evidencio que en las vigas tipo H se pueden obtener buenos módulos de sección óptimos para el cálculo de los diferentes factores de seguridad. Se realizó la sumatoria de fuerzas ($\sum F = 0$) y momentos ($\sum M = 0$) (ver Tabla 3-2) en donde se observó que el factor de seguridad más bajo se encuentra justo en el momento (M2b) en la figura 3-5 se muestran los diagramas y cortantes respectivos a los cálculos realizados.

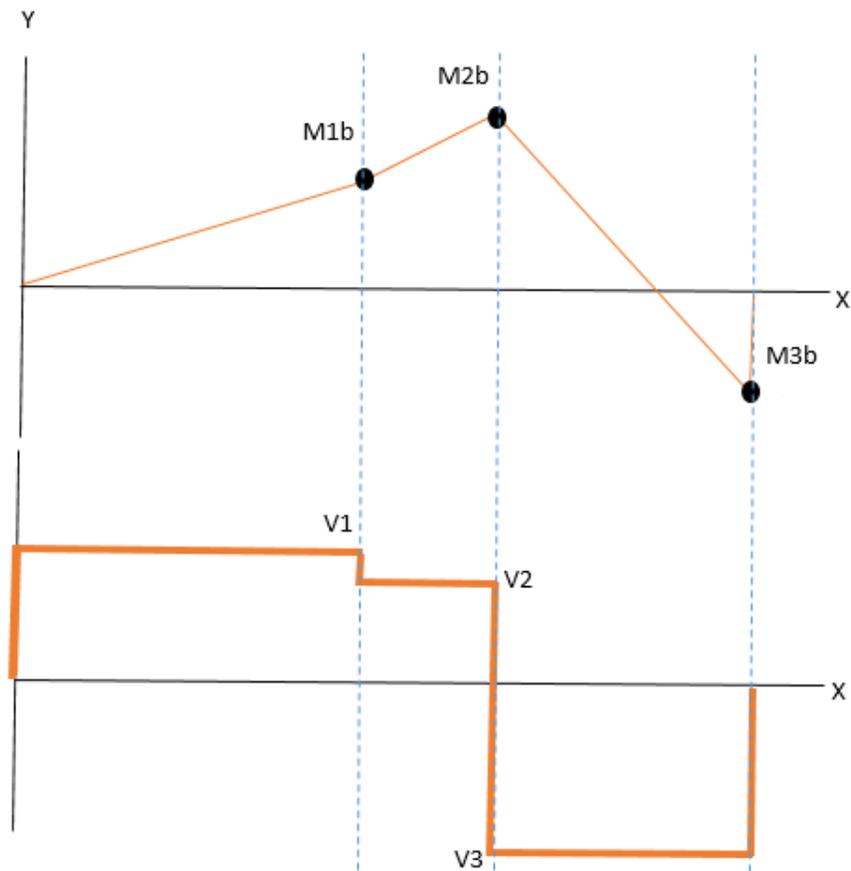
Tabla 3-2 Cálculos de fuerzas, momentos y factores de seguridad del brazo

Sumatoria de fuerzas en x		
Peso Wx	3413,6	N
Fuerza (Faguax)	23231,5	N
Fuerza (Fcx)	194188,3	N
fuerza (Ax)	174370,3	N
Sumatoria de fuerzas en y		
Peso Wy	2598,6	N
Fuerza (Faguay)	17684,9	N
Fuerza (Fcy)	81310,4	N
fuerza (Ay)	66224,1	N
sumatoria de momentos		
Cortante 1 (V1)	17684,9	N
Momento en b1 (M1b)	30948,5	N/m
Cortante 2 (V2)	15086,3	N
Momento 2a (M2a)	30948,5	N/m
Momento 2b (M2b)	42263,3	N/m
Cortante 3 (V3)	-66224,1	N
Momento 3a (M3a)	42263,3	N/m
Momento 3b (M3b)	-23960,8	N/m
momento 1b factor de seguridad (Fs)	3,42	-
momento 2b factor de seguridad (Fs)	2,51	-
momento 3b factor de seguridad (Fs)	4,42	-

Fuente: Elaboración propia

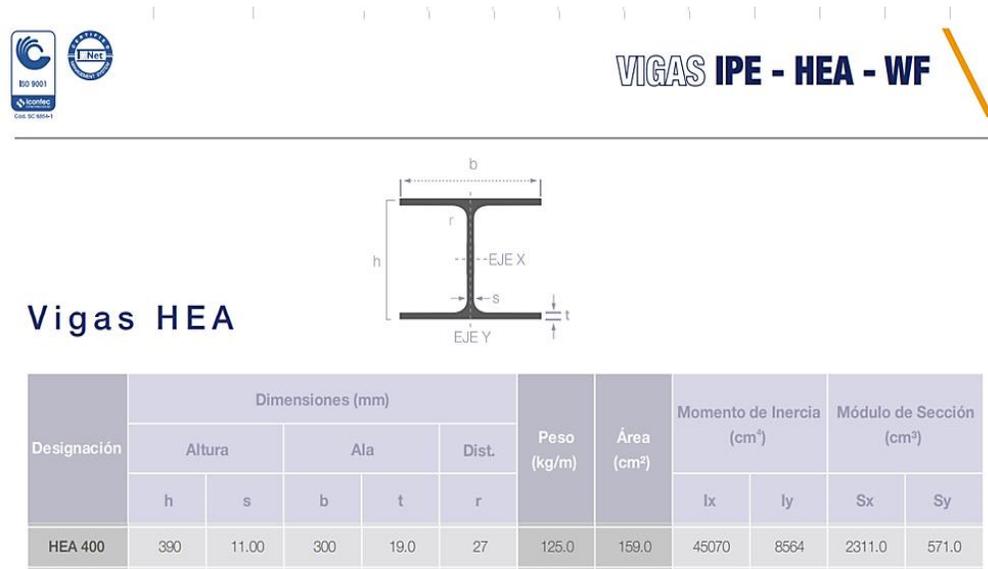
Antes de realizar los cálculos respectivos de flexión se tuvieron en cuenta todos los siguientes pasos para poder dar una validez de la teoría (Ferdinand, 2009): debe ser una viga recta, larga y angosta, con sección transversal uniforme; las cargas y reacciones actúan perpendicular al eje de la viga y no se considera el alabeo; el material de la viga se considera homogéneo, con un módulo de elasticidad igual a compresión y a tensión.

Figura 3-5 diagrama de momentos y cortantes en el brazo



Fuente: Elaboración propia.

Las vigas tipo H son perfiles laminados en caliente fabricado con estándares de calidad descrito por la ASTM (A572 y A992) con un $F_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$. Como se describe en la figura 3-6 del catálogo podemos obtener. Las dimensiones, el peso, el área, el momento de inercia en I_x y el módulo de sección S_x (Metaza, 2020).

Figura 3-6 Especificaciones de la viga tipo H.

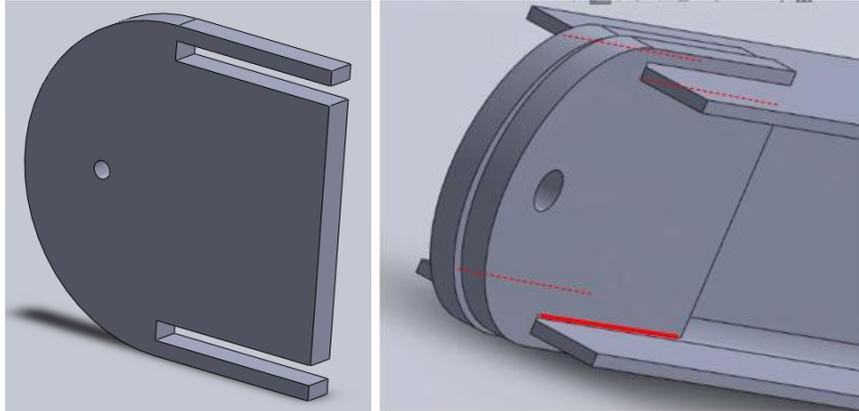
Fuente: Metaza (2020).

3.3.1. Geometría de la chapa y cálculo de soldadura

El brazo propuesto debe de tener en los externos un diseño para poder articularlo por tal motivo se diseñó un modelo de chapa (figura 3-7), la cual será unida mediante un cordón de soldadura. Para ello primero se debe:

- Encontrar el sitio de la soldadura donde la combinación de fuerzas será máxima. Puede ser necesario tratar varios puntos. Encontrar todas las fuerzas en la soldadura en ese sitio.
- Combinar vectorialmente todas las fuerzas en la soldadura en ese punto
- Encontrar el tamaño requerido de la soldadura dividiendo el valor encontrado en b) entre los esfuerzos de diseño según sea el estado de carga.

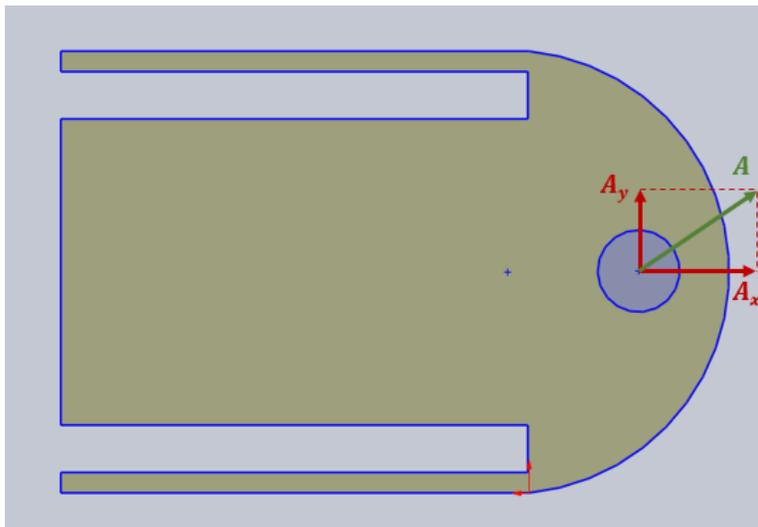
Figura 3-7 chapa para los extremos del brazo.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la reacción en el punto A calculada en la sección 3.3 se tiene dos componentes en los ejes x, y. La reacción A_x ejerce un cortante directo estimado con la fuerza1 (F1). La reacción A ejerce un efecto de torsión calculado con la fuerza2 (F2) como se muestra en la figura (3-8)

Figura 3-8 Reacciones en el pasador



Fuente: elaboración propia.

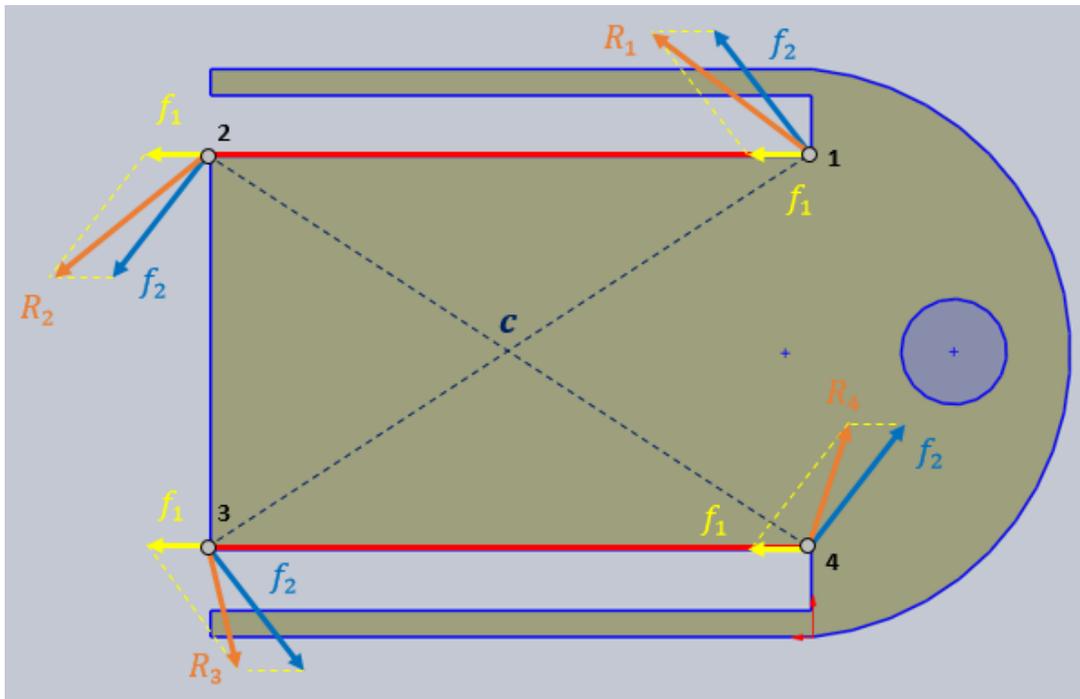
$$F1 = \frac{\left(\frac{A_x}{2}\right)}{2L_1} = 20262,01 \frac{N}{m} \tag{3-7}$$

Siendo A_x es la fuerza en el punto A del brazo, y L_1 es la longitud del cordón de soldadura en el eje x

$$F_2 = \frac{Tc}{J_w} = 266294,23 \frac{N}{m} \quad (3-8)$$

Aquí T es el torque, c es la distancia del radio del centroide, J_w es el momento polar de inercia (depende del tipo de carga y la ubicación de los cordones de soldadura). En la suma vectorial se evidenció que el punto 1-2 tienen un ángulo de $56,78^\circ$ con una fuerza resultante (R_1) de 27.8 kN/m y los puntos 3-4 un ángulo de $123,22^\circ$ con una fuerza resultante (R_3) de 255.8 kN/m (Figura 3-9) debido a los resultados obtenidos el tamaño del cordón de soldadura fue calculado con la fuerza resultante de mayor valor, dando como resultado un ancho cordón (W) de $11,2 \text{ mm}$ y un espesor de garganta (t) de $7,9 \text{ mm}$ utilizando una soldadura: Electrodo E60 por su compatibilidad con el acero A36.

Figura 3-9 Angulo para el cálculo del vector resultante



Fuente: elaboración propia.

3.4. Cálculo de pasadores

Teniendo en cuenta el análisis de las fuerzas calculado en el capítulo 3.3 Se seleccionó acero inoxidable de la serie 300 tipo 316 para el diseño del pasador debido a su alta resistencia a la fluencia, tracción e ideal en ambientes marinos (Matmatch, 2020) con las siguientes características: límite de fluencia (S_y)= 82 GPa, esfuerzo admisible (S_{ut})= 690 GPa y un factor de seguridad (F_s)= 1,5. Se halló el diámetro del pasador utilizando primero un cálculo estático basado en el criterio de tresca y asignando un esfuerzo admisible para choques e impactos = $S_{ut}/12$.

$$\tau = \frac{F}{A_{total}} \leq \frac{s_{ut}}{F_s} \quad (3-9)$$

Donde F es la fuerza en el punto, A_{total} es el área total a cortante, S_{ut} es el esfuerzo admisible, F_s es el factor de seguridad. El diámetro obtenido sirve como referencia para el cálculo del factor de seguridad a fatiga (parte dinámica). Se evaluó la resistencia del pasador sometido a esfuerzos medios y alternantes, utilizando el criterio de falla dado por la ecuación de Soderberg (Norton, 2010).

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = \frac{1}{F_s} \quad (3-10)$$

Donde S_e es el límite de fatiga modificado, S_{yt} es la resistencia a la rotura por tracción, F_s es el factor de seguridad, σ_m es el esfuerzo medio, σ_a es el esfuerzo alternante. Para hallar la longitud (L) del pasador fue necesario realizar el cálculo estático estudiando el efecto de aplastamiento del pasador despejando la longitud mediante la fórmula:

$$L = \frac{FFs^2}{S_y d} \quad (3-11)$$

Donde F es la fuerza en los puntos (A o B), F_s es el factor de seguridad, S_y límite de fluencia y d es el diámetro del pasador.

3.4.1. Cálculo del pasador unión de anclaje – brazo

En primer lugar, el pasador en esta área será a dos cortantes, por tanto, el diámetro despejado de la ecuación (3-8) de Tresca dio como resultado

$$D = \sqrt{\frac{24 F F_s}{\pi S_{ut}}} = 56,3 \text{ mm}$$

Aproximando este valor a uno comercial se puede decir que el pasador queda de 60 mm

y es utilizado para realizar el cálculo dinámico. Para el análisis dinámico se tuvo en cuenta los esfuerzos cortantes y normales del círculo de Mohr. En la ecuación (3-9) de Soderbergh se despejó el factor de seguridad y se obtuvo el siguiente resultado.

$$F_s = 2,2$$

Habiendo validado la parte estática y dinámica podemos decir que el diámetro hallado es útil para soportar las fuerzas a cortante que se pueden tener durante la operación. La longitud del pasador se despejó del análisis de la ecuación (3-10) dando como resultado:

$$L = 213 \text{ mm}$$

3.4.2. Cálculo del pasador unión brazo – flotador

En primer lugar, el pasador en esta área será a cuatro cortantes, por tanto, el diámetro despejado de la ecuación (3-8) de Tresca dio como resultado:

$$D = \sqrt{\frac{24 F F_s}{\pi S_{ut}}} = 15,74 \text{ mm}$$

Aproximando este valor a uno comercial se puede decir que el pasador queda de 16 mm

y es utilizado para realizar el cálculo dinámico. Para el análisis dinámico se tuvo en cuenta los esfuerzos cortantes y normales del círculo de Mohr. En la ecuación (3-9) de Soderbergh se despejo el factor de seguridad y se obtuvo el siguiente resultado.

$$F_s = 2,2$$

Habiendo validado la parte estática y dinámica podemos decir que el diámetro hallado es útil para soportar las fuerzas a cortante que se pueden tener durante la operación. La longitud del pasador se despejo del análisis de la ecuación (3-10) dando como resultado:

$$L = 40 \text{ mm}$$

3.5. Cálculos del sistema hidráulico

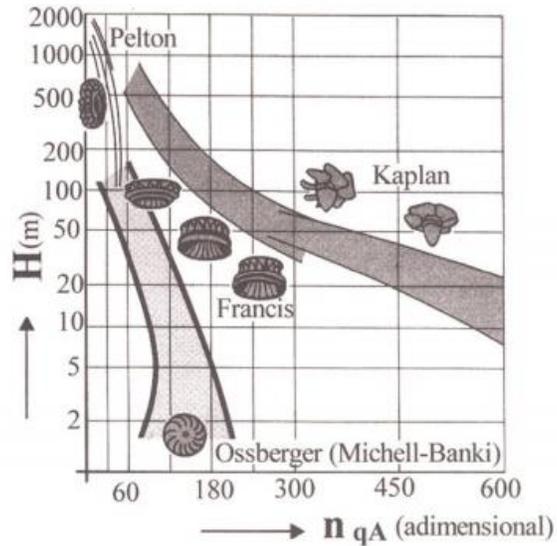
En este capítulo se realizarán una serie de cálculos de presiones, caudal, diámetros, perdidas por accesorios y tubería. Para poder seleccionar el tipo de turbina, cilindro hidráulico, amortiguador y tanque. Todo esto se realizará bajo la norma ANSI y ASME teniendo en cuenta las condiciones ambientales que deben soportar los equipos será en su mayoría seleccionados en materiales de acero inoxidable AISI 316, la tubería seleccionada es de acero galvanizado con un recubrimiento en una pintura epoxica para evitar que la salinidad la oxide y así causar un daño prematuro. En primer lugar, se seleccionará la turbina

3.5.1. Selección de la turbina hidráulica y el generador

De acuerdo a la literatura se seleccionó una turbina Pelton por ser la única que trabaja a una velocidad específica (Nq_A) entre el rango de 0-70 figura (3-10) debido a sus bajos caudales de operación y a su capacidad de altura hidráulica para este caso se

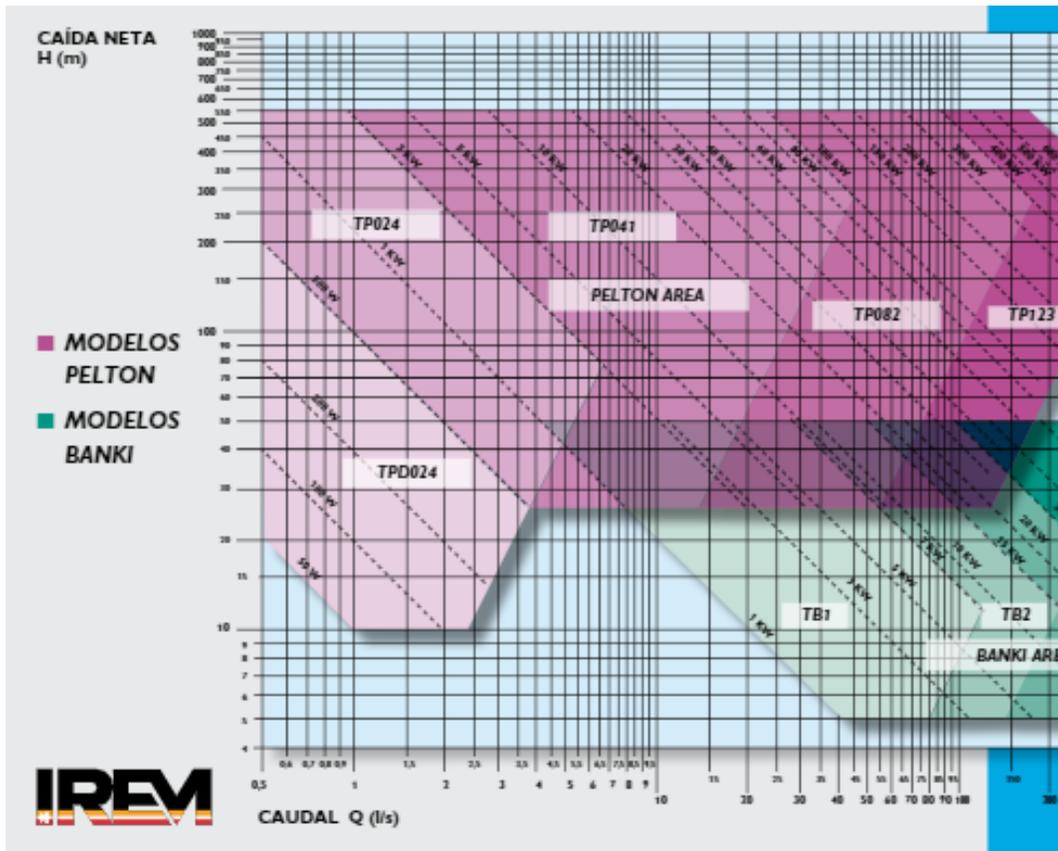
seleccionó del catálogo del fabricante IREM eco watt hidro una turbina de tipo TP024. Este tipo de turbina puede generar 1 kW teniendo en cuenta una altura hidráulica (H) = 200 m y un caudal de 1 L/s figura (3-11).

Figura 3-10 Velocidades específicas para las turbinas.



Fuente: Lopes (2006).

Figura 3-11 Selección de bomba hidráulica



Fuente: IREM (2020).

La turbina está fabricada en acero inoxidable (bajo pedido) para garantizar que no se afecte por temas de corrosión y también cuenta con pintura de poliuretano. El rotor de la turbina está ensamblado directamente al eje del generador para mejorar su eficiencia. El generador es de tipo síncrono autoexcitado sin escobillas, 4 polos (trifásico o monofásico), con un voltaje 230/400 V y una frecuencia 50/60 Hz capaz de suministrar potencia hasta 4 viviendas figura (3-12) (IREM, 2020).

Figura 3-12 turbina Pelton con generador modelo TP024.



Fuente: Irem (2020)

Normalmente, la carga de 200 m produce presión en el agua antes del inyector. En el sistema undimotriz, la presión es generada por el cilindro hidráulico que es accionado por la onda. La velocidad del chorro a la salida del inyector se estima sea,

$$C = \varphi \sqrt{2gH} = 60,7 \text{ m/s} \quad (3-12)$$

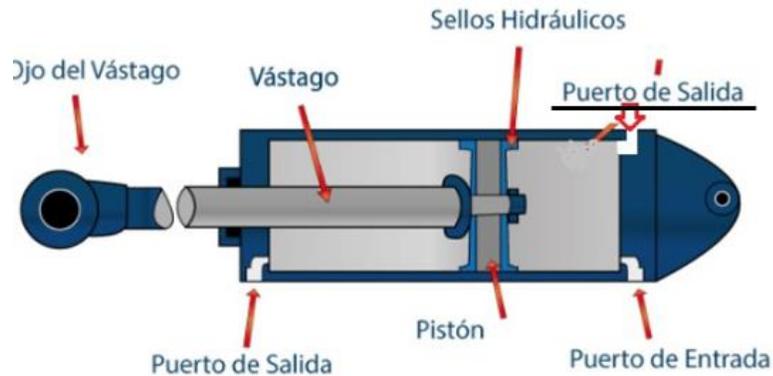
Donde φ es el coeficiente de velocidad promedio (0,97), g es la aceleración de la gravedad y H es la altura hidráulica de la turbina.

3.5.2. Cálculo del cilindro

Las fuerzas F_c calculadas en la sección 3.3 son las que soportará el cilindro en las posiciones superior e inferior se calculan las características que deberá tener el cilindro. Debe de ser fabricado bajo la norma ISO 3320 para cilindros hidráulicos. El cilindro debe ser fabricado de forma especial ya que como lo muestra en la figura (3-13) es necesario adicionar un puerto de salida. El cilindro funcionara de una forma

similar a la utiliza por la empresa eco wave Power (Eco Wave Power, 2016). En donde el cilindro mientras realiza el avance se encarga de llenar la cámara con el fluido y a momento de realizar el retroceso se encargará de enviar el fluido con una presión y un caudal.

Figura 3-13 partes de un cilindro



Fuente: Aceros y sistemas (2019).

3.5.2.1. Carrera y diámetro del vástago

El dimensionamiento iterativo para obtener la mejor ventaja mecánica posible (sección 3.3) fue realizado, teniendo como requerimiento, encontrar una carrera adecuada. Como resultado se llegó a longitudes de 308,6 mm en la posición superior y 500 mm en la posición inferior. Esto significa que, para la configuración final, la carrera obtenida como la resta de ambas longitudes es de 191,4 mm (0.1914 m). El volumen del cilindro se hallará de acuerdo a la carrera y a un caudal de 2,0 L/s. por tanto el vástago del cilindro tendrá una longitud de 500 mm. En sistemas similares se observa que los vástagos tienen longitudes considerables sección 2.4 con el fin de proteger el cuerpo del cilindro del contacto con el agua (salinidad y fuerzas)

3.5.2.2. Chequeo por pandeo

Para este estudio, se aplica el método convencional. Esta aproximación considera al vástago como una columna sometida a una fuerza de compresión perfectamente alineada con el eje longitudinal. En primer lugar, se determina la relación de esbeltez

(Re). Para ello se debe calcular la longitud equivalente (Le) teniendo en cuenta la constante k de una columna empotrada-articulada ($k= 0,8$), la longitud del vástago (L) de 0.6 m, e iterar el diámetro de vástago (Dv). Para comenzar se asignó $Dv = 0,034m$.

Radio mínimo (r_{min}).

$$r_{min} = \frac{Dv}{4} = 0,0085 \text{ m} \quad (3-13)$$

Longitud equivalente (Le)

$$L_e = K L = 0,4 \text{ m} \quad (3-14)$$

Relación de esbeltez.

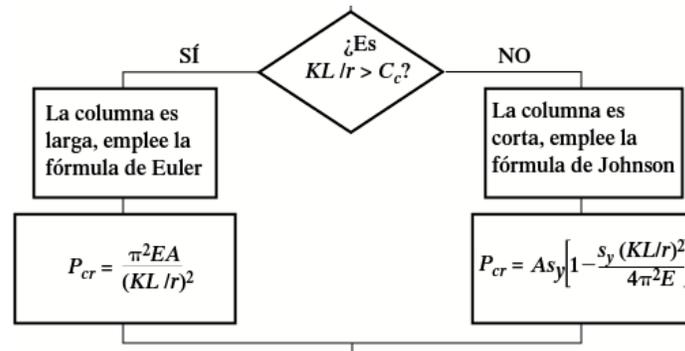
$$Re = \frac{KL}{r_{min}} = 47,06 \quad (3-15)$$

Dónde r_{min} es el radio de giro mínimo ante el pandeo. En segundo lugar, se calcula la Constante de la columna (Cc) teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 630 endurecido (utilizado para cilindros hidráulicos) como su límite de fluencia ($Sy = 1276 \text{ MPa}$) y módulo de elasticidad ($E = 207 \text{ GPa}$).

$$Cc = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Sy}} = 56,59 \quad (3-16)$$

En tercer lugar, se realiza una comparación entre la relación de esbeltez y la contante de la columna si $Re > Cc$ se aplica la ecuación de Euler de lo contrario se aplica la ecuación de Johnson, para poder hallarla carga critica (Figura 3-14).

Figura 3-14 Condicional para la constante de la columna



Fuente: Mott (2006).

Debido a que en este caso $Re < Cc$ se aplica la fórmula de Johnson.

$$P_{cr} = ASy \left[1 - \frac{SyRe^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (3-17)$$

$$P_{cr} = F_s F_{C1} = 1\,270\,085,9 \text{ N}$$

Fuerza que carga haría pandear el vástago. Dónde F_s es el Factor de seguridad, F_{C1} es la carga cuando el brazo esta abajo. De la fórmula de Johnson se despeja el diámetro y luego se calcula de nuevo para poder conocer el valor real.

$$D_v = \sqrt{\frac{4 P_{cr}}{\pi S_y \left[1 - \frac{SyRe^2}{4\pi^2 E} \right]}} \quad (3-18)$$

Este valor es equivalente a 1,49 in (37.85 mm). De acuerdo a la información encontrada en el catálogo de la empresa CIROSA hidráulica, el diámetro más cercano es 1,75 in equivalente a (44 mm). Recalculando, el factor de seguridad es de 1,5.

3.5.2.3. Diámetro del cilindro

Para el cálculo del diámetro del cilindro se tiene en cuenta el doble del caudal requerido para el funcionamiento de la turbina como en este caso es la turbina necesita un caudal de $(Q_t) = 1 \text{ L/s}$ entonces en del cilindro será $(Q_c) = 2 \text{ L/s}$, un periodo

(T) = 6,7 s pero tardara en llenarse en la mitad del tiempo por tanto (T) = 3,35 s y una carrera (C) = 0,1914 m hallada con anterioridad en el capítulo (3.5.2.1). De la ecuación de caudal:

$$Q = \frac{ApC}{T} \quad (3-19)$$

Se despejo el diámetro del cilindro dando como resultado 211 mm. Por tanto, este tipo de cilindro no es tan comercial y debe de ser fabricado de forma especial. Para ello se debe contactar un proveedor que se encuentre en la capacidad de fabricarlo teniendo en cuenta los esfuerzos producidos por el brazo capitulo (3.3) la carrera y un factor de seguridad mínimo de 1,5. El volumen almacenado en el cilindro es:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 c = 0,006712 \text{ m}^3 \quad (3-20)$$

Donde D es el diámetro del cilindro y c es la carrera. Realizando la conversión a litros se obtiene un valor de 6.7 L.

3.5.3. Selección del tanque

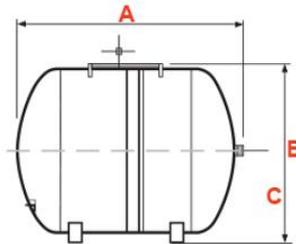
El tanque de presión será utilizado para almacenar un volumen que garantice una presión y un caudal necesarios para la operación de la turbina hidráulica Pelton. Será seleccionado bajo los requerimientos establecidos por el código ASME sección VII división 1 NORMAS PARA CONSTRUCCION DE RECIPIENTES A PRESIÓN (Tirenti, 2019). En primer lugar, se calculará el volumen del cilindro.

- **Cálculo del volumen (V) del tanque de presión**

El volumen del tanque de presión debe de ser como mínimo el volumen del cilindro para garantizar un flujo constante. Por consiguiente, se tendrá en cuenta el cálculo del volumen del cilindro realizado en la sección 3.5.2. De esta forma, se seleccionó el tanque fabricado por la empresa Aquatrece que tiene las siguientes características: una membrana (clorobutil), conexión en acero inoxidable, acabado especial (pintura de poliuretano), válvula de aire con sello (tapón) anti escape, que puede ser utilizado

en ambientes marinos (Aqua trece, 2020). El tanque se seleccionó del catálogo de la figura (3-15) el cual debe de ser el modelo MNP20H.

Figura 3-15 catálogo de tanque



MODEL		MP STEEL SPECIFICATIONS						
		NOMINAL CAPACITY	CONNECTIONS	DIMENSIONS			SHIPPING BOX VOLUME	SHIPPING BOX WEIGHT
[gal]	[inch]			A	B	C		
BSP	NPT			[inch]	[inch]	[inch]		
HORIZONTAL MODELS								
MBP20H	MNP20H	5.3	1" SS MALE	17.6	11.6	6	1.5	13.4
MBP24H	MNP24H	6	1" SS MALE	17.8	12.7	6.4	1.85	14.3
MBP35H	MNP35H	9.2	1" SS MALE	18.9	13.9	7	2.5	17.6
MBP60H	MNP60H	14	1" SS MALE	21.1	16.6	8.5	3.6	27.6
MBP90H	MNP90H	20	1" SS MALE	29	16.6	8.5	4.7	38.5
MBP100H	MNP100H	26.4	1" SS MALE	29	19	9.6	6.04	42.3

Fuente: Aquatrece (2019)

3.5.4. Cálculo de la tubería y accesorios.

Por selección de la turbina Pelton en la sección (3.5.1) se recomienda un diámetro de tubería de 1"1/2. No obstante se recalcula teniendo en cuenta el caudal (Q)=0.002 m³/s requerido de funcionamiento y una velocidad dada por la norma ANSI/HI 9.8-1998. Donde habla que la tubería debe tener una velocidad de 1,7 m/s. por tanto el diámetro que necesita la tubería se calculó en la tabla (3-3):

Tabla 3-3 Diámetro de la tubería

caudal (Q)	0,002	m ³ /s
Velocidad del fluido (V)	1,7	m/s
Diámetro tubería (Dt)	38,7	mm
	1,52	pg

Fuente: Elaboración propia

Para el material de los accesorios y la tubería se seleccionó acero galvanizado por su resistencia a las presiones de operación y el ambiente corrosivo que se encuentra en el lugar la parte externa de la tubería debe de ir cubierta por una pintura epoxi coaltar

free(Pintuco, 2020) que ayude a proteger todo el sistema. las perdidas por tuberías y accesorios se calcularán a continuación. Primero se halló el factor de fricción (f) aplicando la fórmula de Haaland (Haaland,1983).

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -1.8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} \right)^{1.11} \right] = 2.94 \times 10^2 \quad (3-21)$$

Aquí Re es el número de Reynolds, ϵ es la rugosidad en este caso acero galvanizado y D es el diámetro de la tubería. Se estima que el sistema en la parte de succión cuente con una válvula antirretorno a la entrada del cilindro, 2 codos de 90°, una salida de tanque, un tramo de tubería de 8,5 m. En la parte de descarga cuente con 2 válvulas antirretorno (salida del cilindro y entrada al tanque de presión), una T para conectar el acumulador de pistón, 3 codos de 90° y un tramo de tubería de 10m. Con base a esto se realizó la sumatoria de pérdidas, por fricción y accesorios, respectivamente:

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3-22)$$

$$hk = \sum \left(K \frac{V^2}{2g} \right) \quad (3-23)$$

Siendo f el factor de fricción del material de la tubería (calculado con anterioridad), L la longitud de la tubería, D el diámetro de la misma, V la velocidad del agua en su interior, g la aceleración de la gravedad y k el coeficiente de pérdida de cada accesorio. Los resultados obtenidos fueron, pérdidas de energía en la tubería de succión de 0,7 m y en la descarga de 0,6 m para un total de todo el sistema de 1,3 m. Los coeficientes k se pueden visualizar en la tabla (3-3). Dando como resultado pérdidas por accesorios en la succión de 0,4 m y en la descarga de 1 m para un total de 1,4 m.

Tabla 3-4 coeficientes K

Accesorio	K
Codo 90 ° (Kc)	0,2

Válvula antirretorno (Kv)	1,0
T (Kt)	2,0
Salida del tanque (Ksal)	0.5
Cambio de sección tubería (KL)	0,4

Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Cálculo de selección del amortiguador

El amortiguador es un equipo que será muy útil en el sistema, ya que con él se protegerá el sistema de vibraciones, pulsaciones, cavitación, sobretensión, golpe de ariete. Se seleccionará un amortiguador que cumpla con las especificaciones de fabricación bajo la norma ANSI, con materiales en acero inoxidable tipo AISI 316 ya que este material es de uso frecuente en ambientes marinos debido al alto grado de salinidad que va a recibir exteriormente. Para poder seleccionar el amortiguador se debe de calcular un volumen teniendo en cuenta las presiones de entrada y salida de él. En primer lugar, se calculó la presión de entrada (P1) del amortiguador teniendo en cuenta las pérdidas ocasionadas por los accesorios y la tubería hasta la entrada del amortiguador.

$$P1 = Pi - \sum_1^E H = 4850368,4 Pa \quad (3-24)$$

$$P2 = PF + \sum_E^2 H = 2885261,7 Pa$$

Después de haber hallado las presiones en los puntos de entrada (P1) y salida (P2) del amortiguador se aplica la fórmula de la ecuación (3-23) para hallar el volumen para poder seleccionar el amortiguador adecuado.

$$V = \frac{Q}{1 - \left(\frac{P2}{P1}\right)^{\frac{1}{n}}} \beta = 3,3 gal \quad (3-25)$$

Donde: n es el exponente politrópico a una temperatura de 75°F y una presión promedio de 558 Psi $n=1,5$. β es un valor medido experimentalmente de 1.11 para acumulador de pistón. Dando como resultado un volumen de 3,4 gal por tanto se selecciona un amortiguador hidroneumático de 4 gal. Fabricado por la EPEITALIA.

4. Análisis de resultados

4.1. Sistema oscilante

4.1.1. Boya

Se estudiaron las diferentes geometrías para la boya e inicialmente se había diseñado un semi-elipsoide. Después de analizar el volumen desplazado y la fuerza de flotación se evidencio que el volumen sumergido no fue suficiente motivo por el cual y también por diseños encontrados en otros trabajos, se tomó la decisión de diseñar una boya con un volumen compuesto por una parte cilíndrica y una media esfera, garantizando un mejor volumen y ajustándose a la potencia de diseño. La potencia de diseño de 6.8 kW/m, porque en su momento fue el dato más cercano a la costa y más alto en el país.

A pesar de que la boya cúbica tiene el mayor volumen desplazado, no es conveniente porque tiene aristas vivas que actúan como generadores de turbulencia. Esto puede afectar la eficiencia del sistema. Con respecto a la geometría de la boya, se realizó una propuesta incluyendo la estructura interna pensando en la distribución de fuerzas generada a partir de la fuerza ejercida sobre la boya. Así, se compone de un miembro central unido a cerchas que toman la geometría deseada, donde el centroide del volumen desplazado está por encima del centro de gravedad (principio de flotabilidad en la sección 2.3) para evitar que la boya no se voltee.

Se comparo una serie de ángulos en busca de encontrar la mejor ventaja mecánica para el cilindro, encontrando que cuando los ángulos se asemejan más se podía obtener una mayor amplificación de la fuerza, Sin embargo, al momento de realizar el análisis de posición del mecanismo en el software SolidWorks se evidencio que para esa condición la carrera del cilindro resultaba muy corta. Esto incrementaba el diámetro

del cilindro por encima de lo permitido por la norma ISO 3320. Por esta razón con el programa SolidWorks se buscó la configuración de ángulos suficiente para entregar el volumen y caudal a la turbina Pelton. Se podría utilizar herramientas computacionales para explorar una relación geométrica que aumente la carrera del cilindro y conserve o mejore la ventaja mecánica

4.1.2. Brazo

El brazo consiste en una viga tipo H dado que la inercia juega un papel fundamental en el comportamiento ante las cargas de flexión. No fue necesario colocar algún tipo de refuerzo estructural debido al factor de seguridad que se logró alcanzar en cada punto evaluado (sección 3.3). En la parte extrema del brazo se instalarán chapas para poder articular el brazo teniendo en cuenta el cálculo de la soldadora y los esfuerzos que soportara el sistema. No obstante, se requiere un análisis computacional que garantice hacer uno calculo más minucioso para evitar algún tipo de fallo.

El sistema del brazo requiere un análisis más minucioso para poder asegurar que al momento de realizar el contacto con el agua siga el movimiento durante el mismo periodo de la ola. Se seleccionó acero estructural para el diseño del brazo y de la boya debido a sus propiedades mecánicas, en este caso muy buenas para los diferentes esfuerzos que tendrá que soportar los elementos, para evitar la oxidación se debe de aplicar un tipo de pintura epóxica, por ejemplo, la Epoxic coaltar free. Además, es un material mucho más económico que el acero inoxidable.

El pasador puede ser fabricado en acero endurecido de la serie 300 tipo 316 inoxidable, ya que cuenta con las características necesarias de resistencia a la tracción para soportar las cargas y lo más importante, es ideal para operar en ambientes altamente corrosivos. Un acero al carbono requeriría de pintura epóxica u otro recubrimiento, pero se vería en riesgo constante de corrosión debido a la exposición al agua de mar que puede entrar en contacto con el movimiento de las olas.

4.2. Sistema hidráulico

4.2.1. Turbina Pelton

Se seleccionó una turbina Pelton debido que por su diseño es la única que puede trabajar a gran altura (H) y a diversos caudales (alto, medio y bajo) en este caso sería un caudal muy bajo a diferencia de la turbina de modelo banki que manejan alturas hidráulicas bajas y caudales (medios y altos). Para el funcionamiento de la turbina se seleccionó un solo inyector. También se contempló la utilización de una bomba hidráulica pero las presiones encontradas no fueron suficientes para su funcionamiento.

4.2.2. Cilindro hidráulico.

El cilindro hidráulico se diseñó para que pueda abastecer el fluido necesario para el sistema teniendo en cuenta el caudal para ser almacenado en el tanque de presión y la presión requerida por la turbina. Se realizó un chequeo por pandeo utilizando el método convencional con un factor de seguridad de 6 para sistemas oleohidráulicos dando como resultado un diámetro de 34 mm.

El diámetro interno del cilindro tuvo un condicional que fue la carrera obtenida por la configuración de ángulos y la ubicación del extremo del vástago del cilindro, obtenidas por el programa CAD. El cilindro debe de ser fabricado de manera especial debido a la ubicación del puerto de salida adicional (figura 3-6) para que pueda actuar como bomba al momento de realizar el avance y el retroceso.

4.2.3. Tanque

El tanque se seleccionó con base a él volumen entregado por el cilindro teniendo en cuenta el cumplimiento para su fabricación establecido por la norma ASME para recipiente y tanques a presión. Sin embargo, el cilindro aportara al sistema un volumen de 6,7 L y el tanque más cercano a lo requerido es un tanque fabricado por la empresa aquatrece tipo MNP20H de 5,3 Gal.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Según la investigación de sistemas de captación undimotriz on-shore, se encontró que países como España cuentan con un potencial de generación por metro de frente de onda de 100 kW/m. Países en Suramérica como Chile pueden llegar a hasta 40 kW/m. No obstante, a pesar de que Colombia cuenta con dos océanos (Pacífico y Atlántico), el potencial de generación de energía por metro de frente de onda oscila entre 3 y 15 kW/m según la época del año. Esto se debe a su ubicación geográfica, donde los vientos no llegan con la misma intensidad como en otros sitios del mundo. Por esta razón los sistemas de energía undimotriz no se han explorado en la misma medida, pero existe un potencial de generación que puede llegar a suplir demandas puntuales.

Se realizó un estudio geométrico en el software SolidWorks (figura 3-5) para encontrar condiciones que permitieran amplificar la ventaja mecánica del brazo. Esto incluyó un rango de longitudes para el brazo y la conexión del cilindro hidráulico (L1 y L2), así como los ángulos del brazo (α y θ). Se encontró que mientras los ángulos se asemejaban más, la fuerza podía amplificarse notablemente. Sin embargo, al verificar la carrera del cilindro en esta condición, se observó que la carrera era muy corta. Esto significa que se requería un diámetro de cilindro muy grande para cumplir con el volumen requerido. Por esta razón, la carrera del cilindro se pasó a ser el criterio para buscar una configuración de longitudes y ángulos apropiados para garantizar un volumen que hiciera funcionar una turbina.

Para diseñar la boya se tuvo en cuenta lo encontrado en la literatura, que involucra teorías de flotabilidad, formas de estructuras, normas, materiales y parámetros para la fabricación. Entre los parámetros de fabricación, se encontró que para el diseño el centroide del volumen desplazado debe estar por encima del centro de gravedad de la

estructura para evitar que la boya se voltee al momento de ser sumergida en el agua. La forma de diseño para la boya puede variar. Se seleccionó una geometría de media esfera más un cilindro corto para garantizar que sin importar la dirección de la ola esta pueda generar un movimiento constante y poder así ejercer la fuerza que requiere el cilindro para su correcta operación. Se encontró que formas redondeadas son más hidrodinámicas y generan menos pérdidas de energía.

Como resultado del estudio geométrico, el diseño final tiene una longitud del brazo de 3.5 m de longitud y 1 m para el cilindro, logrando una ventaja mecánica de 215151. El cálculo de fuerzas y esfuerzos se realizó considerando el brazo como una viga. Esto permitió conocer los puntos críticos de la viga para los cuales el factor de seguridad fue determinado por encima de 2,5. De esta forma fue posible escoger una viga H de acero A36 (Metaza,2020). El cálculo de reacciones también permitió el cálculo de las chapas de acero ponga el tipo de acero de 40 mm de espesor, para unir articular la viga en el apoyo y la boya. Las reacciones ejercen esfuerzos de cortante y torsión que permitieron el cálculo de los cordones de soldadora por el método de línea. Como resultado, se obtuvo cordones de 11,16 mm de electrodo E60 de diámetro 7,8 mm.

El cálculo de reacciones también permitió determinar el diámetro de los pasadores en cada extremo, tanto en el apoyo como en la unión con la boya. Fueron diseñados de acuerdo al cálculo estático basado en el criterio de tresca y el cálculo dinámico basado en el criterio de soderberg obteniendo un diámetro de 56,3 mm y un factor de seguridad de 1,5. Después siguió la verificación de ese diámetro bajo cargas dinámicas, obteniendo un diámetro de 60 mm y un factor de seguridad de 2,2. Adicionalmente, se realizó el cálculo estático estudiando el efecto de aplastamiento, con lo cual se requería una longitud mínima de 213,73 mm. El material para ser diseñado es el acero inoxidable AISI 316 debido a sus propiedades mecánicas y su fuerte capacidad de oponerse a la corrosión. Ponga cada valor.

El cilindro fue diseñado bajo la premisa de que pudiera almacenar un volumen tal que pudiera garantizar un caudal de 2 L/s para el funcionamiento requerido por la turbina. La longitud del vástago salió de acuerdo a la carrera obtenida en SolidWorks (191,4

mm) y las longitudes de ubicación del mismo (figura 3-5). Para el chequeo por pandeo, se utilizó el método convencional que considera el vástago como una columna dando como resultado un diámetro de 1,75 in. Se asignó un factor de seguridad de 6 para se utiliza para sistemas oleohidráulicos.

Para el diseño del tanque a presión se tuvo en cuenta el volumen entregado por el cilindro y las presiones de operación según la norma ASME sección VIII. En esta norma se habla de los criterios para la construcción de recipientes a presión, en este caso, deben ser fabricados con materiales inoxidables y recubiertos con pintura de poliuretano ya que esta es resistente a la corrosión. De acuerdo a la necesidad se encontró un tanque distribuido por la empresa Aquatrece con las características requeridas. El tanque es de referencia MNP20H, con un volumen de 20 litros.

El sistema hidráulico utiliza agua dulce y utiliza una cantidad mínima pequeña de accesorios. La longitud y tipo de accesorios sirvieron para determinar las pérdidas por fricción y accesorios. La velocidad del agua consideró las recomendaciones dadas por la norma ANSI/HI 9.8-1998, lo que sirvió para calcular el diámetro de la tubería. El material seleccionado para la tubería es acero galvanizado con unas propiedades mecánicas que cumplen con la necesidad y también debe de ir recubierto con una pintura anticorrosiva pintura epoxi coaltar free(Pintuco, 2020)

Desde un comienzo se conocía que la turbina Pelton podría utilizarse debido a que es utilizada para bajos caudales y cargas relativamente elevadas. La turbina podría ser diseñada, pero por razón de costos se prefirió seleccionarla de un fabricante. En este caso, la empresa Savoia fabrica una turbina que produce 1 kW que puede ser utilizado en aproximadamente 4 viviendas. Con este trabajo se busca dar inicio a una serie de estudios para incursionar más con el tema de energías limpias, para poder así disminuir las emisiones de CO₂ provenientes de las diversas formas de producir energía.

5.2. Recomendaciones

Si llegase a tener en cuenta para su puesta en marcha se debe de realizar un acompañamiento por personas expertas en el tema para poder así evitar detalles que puedan llegar en un futuro a ser perjudiciales para el sistema.

Se recomienda para futuros trabajos realizar análisis de esfuerzos para el diseño de la boya. Se debe de utilizar software de análisis estructural que tenga en cuenta la variación de las cargas con respecto al tiempo y los materiales de diseño. La boya debe de recalcularse teniendo en cuenta el peso del brazo seleccionado.

Para trabajos futuros se recomienda realizar un análisis más a fondo para poder incrementar el caudal del sistema y poder así generar más energía mediante el uso de software avanzado. Se puede explorar otros equipos para generación de energía (turbinas hidráulicas y motores hidráulicos).

Se recomienda utilizar la norma ISO Ts 13725 para verificar el cálculo de pandeo en el cilindro hidráulico que actúa como bomba de desplazamiento positivo. Se sabe que la norma tiene mayor confiabilidad que el método tradicional, que considera al cilindro como una columna.

A. Anexo: Sistemas undimotrices adicionales

Central de energía Undimotriz en Escocia

En el año 2011 un contrato firmado entre las industrias Aquamarine Power y Fugro Seacore dio inicio, en el archipiélago de las Islas Orcadas (Escocia), una central Oyster para producir energía limpia mediante el aprovechamiento de la tecnología Undimotriz. La potencia de la instalación, cuya construcción inicio en verano, se estimó en 2,4 MW. El programa denominado Oyster 2 consistió en el montaje de una instalación para transformar la potencia de las ondas, ejecutado por la industria Aquamarine Power, llamada también Oyster. Esta tecnología se diseñó para recibir la potencia del oleaje cercano a la costa y transformarlo en energía eléctrica. Las obras se dividieron en dos fases en Billia Croo (Islas Orcadas), donde la compañía contaba con el sistema Oyster Aquamarine Power 1, instalado en 2009 ((Tacoronte, 2011)).

La central se diseñó con base en el tipo de tercera generación y en 2011 la compañía inicio actividades de perforación y montaje de los pilotes de acero para 1 de los tres elementos que requería el Oyster2. Posteriormente en el año 2012 se continuo con el montaje de las 2 estructuras pendientes. Aquamarine Power calculo que unidos, los tres elementos Oyster generarían una potencia de 2.4MW. La potencia generada en la central undimotriz se transfiere por medio de gaseoductos submarinos a una planta de generación única situada en la costa.

Figura A-1: Central de energía Undimotriz en Escocia



Fuente: Tacoronte, 2011

Central de energía Undimotriz en Noruega

Diseñada y presentada por un conglomerado de organizaciones líderes del sector en un plan de desarrollo, prototipos y pruebas, buscaba llevar a cabo el aprovechamiento de la potencia del oleaje a través de una gran boya que sería el corazón del sistema, ya que, con sus impulsores, la potencia del mar se transformaría en potencia eléctrica. Para aprovechar el potencial de la energía mecánica de las olas, la red eléctrica noruega en las aguas de la isla de Runde, instaló el Waves4Power, un sistema pionero del tipo de tercera generación con una potencia estimada de hasta 250 kWh.

La instalación, diseñada de forma sencilla, está compuesta de un tubo vertical abierto en ambos extremos, que atraviesa la boya y se sumerge aproximadamente a 30 metros de profundidad. Este tubo, funciona como una bomba de agua, incorporando un pistón acoplado al convertidor y que se activa con el movimiento. Además, el diseño dispone con un mecanismo de sujeción que ajusta la boya sin restringirle el movimiento vertical, y con un cable que se conecta con un centro de recolección desde el cual la energía se transporta a su vez a la costa a través de otra tubería de hasta 3 kilómetros, de donde se introduce en la red de la compañía eléctrica local Tussa Energy (Eco Inventos, 2017).

Figura A-2: Central de energía Undimotriz en Noruega



Fuente: Eco Inventos, 2017

BIBLIOGRAFÍA.

Aquatece. (2020). Tanque hidroneumático. Abril 15 de 2020, de Aquatrece Sitio web:
<http://www.aquatece.com.co/DetailProduct.aspx?id=114>

Área tecnología. (2019). Turbinas Hidráulicas. Noviembre 05 de 2019, de Área
tecnología Sitio web: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

Banco de occidente. (2002). Golfos y bahías de Colombia. Octubre 03 de 2019, de
Banco de occidente Sitio web: <https://www.imeditores.com/banocc/golfos/cap2.htm>

Gallardo, C. (2017). Estudio de interferencia para diseño y arreglo de boyas tipo wave
star (Tesis de pregrado). Recuperado de repositorio u chile Sitio web:
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150689>

Gispert, C. y Vidal, J.A. (1997). Atlas geográfico universal y de Colombia. España:
Océano.

Palomino, D. (2019). Energía undimotriz o energía de las olas. Septiembre 11 de 2019,
de Energías renovables verdes Sitio web: <https://www.renovables-verdes.Com/energía-undimotriz/>

Duran. (2011). especificaciones técnicas para boyas. 2019, de Dimar Sitio web:
https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/normatividad/res_07712011.pdf

Ecoinventos. (2014). Central undimotriz en Brasil. Septiembre 21 de 2019, de
Ecoinventos Sitio web: <https://ecoinventos.com/central-undimotriz-en-brasil/>

- Ecoinventos. (2017). Noruega ya aprovecha la energía de las olas. Septiembre 16 de 2019, de Ecoinventos Sitio web: <https://ecoinventos.com/noruega-energia-olas-del-mar-instalacion-250-kwh-potencia/>
- Google Maps. (2019). Coordenadas Geográficas. Octubre 05 de 2019, de Google Maps Sitio web: <https://www.coordenadas-gps.com/>
- Haaland, S. E. (Marzo1983). Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow. J. Fluids Eng, 105 (1), 89-90.
- Health. (2011). Taque acumulador. Octubre 06 de 2019, de Halth Sitio web: <https://www.doh.wa.gov/portals/1/Documents/pubs/331-380s.pdf>
- Hidráulica y neumática. (2019). Cilindro Hidráulico. 2019, de hnsa Sitio web: <http://www.hnsa.com.co/cilindros-hidraulicos/>
- Ibarra, M. (2019). Región Pacífica de Colombia. Septiembre 30 de 2019, de Lifeder.com Sitio web: <https://www.lifeder.com/caracteristicas-region-pacifica/>
- IDEAM. (2019). *Servicio mareomográfico: Pronóstico de Pleamares y bajamares en la Costa Pacífica Colombiana*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/cartilla-pronostico-pleamares-bajamares-costa-pacifica-colombiana>
- IDAE. (2011). Plan de energías renovables 2011-2020. Septiembre 20 de 2019, de IDAE Sitio web: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/-plan-de-energias-renovables-2011-2020>
- IREM. (2020). turbina Pelton eco watt hydro. Mayo 10 de 2020, de IREM Sitio web: <https://www.irem.it/es/hydro-power/turbinas-pelton/>
- Lopes, E. A. (2006). Máquinas de fluido. Brasil: Editorial UFSM.

- Más que máquinas agrícolas. (2019). LA ENERGÍA Y EL PODER DE LAS OLAS. Octubre de 2019, de Más que máquinas agrícolas Sitio web:
<http://www.masquemaquina.com/2019/08/la-energia-y-el-poder-de-las-olas.html>
- Metaza. (2020). Vigas. Marzo 05 de 2020, de Metaza Sitio web:
<https://metaza.com.co/wp-content/uploads/2017/10/Ficha-t%C3%A9cnica-Vigas-IPE-HEA-WF.pdf>
- Moriana. (2018). Energías renovables y no renovables. Agosto 20 de 2019, de Ecología verde Sitio web: <https://www.ecologiaverde.com/energias-renovables-y-no-renovables-ejemplos-y-resumen-1248.html>
- Muerza, A.F. (2008). Tecnología undimotriz: energía de las olas. Septiembre 01 de 2019, de consumer Sitio web: <https://www.consumer.es/medio-ambiente/tecnologia-undimotriz-energia-de-las-olas.html>
- Naciones unidas. (2019). Energía asequible y no contaminante. Septiembre 15 de 2019, de Naciones unidas Sitio web: <https://www.un.org/sustainable-development/es/energy/>
- Osorio A.F., Ortega S. y Arango S. (Junio 09 de 2015). Assessment of the marine power potential in Colombia. Elsevier, 53, 966-977.
- Osorio, A.F. (2019). Datasheets_BV01-37.zip. Septiembre 28 de 2019, de Universidad nacional Sitio web:
<https://minas.medellin.unal.edu.co/gruposdeinvestigacion/oceanicos/investigacion/virtualbuoys.html>
- Planelle. (2018). Las emisiones mundiales de CO2. Septiembre 02 de 2019, de El PAIS Sitio web: https://elpais.com/sociedad/2018/12/05/actualidad/1-544012893_919349.html

- Pintuco. (2020). pintura epoxi coaltar free. Mayo 05 de 2020, de Pintuco Sitio web:
<https://pintuco.com.co/productos/epoxi-coaltar-free/>
- RAE. (2019). Válvulas. 2019, de RAE Sitio web: Área tecnología. Mayo 06 de 2019.
Turbinas Hidráulicas. 2019, de Área tecnología Sitio web:
<https://www.areatecnologia.com/-mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>
- Region2. (2019). Gran Avance Presenta Proyecto de Generación de Energía Undimotriz en Puerto Antofagasta. Octubre 11 de 2019, de Region2Cl Sitio web:
<http://www.region2.cl/gran-avance-presenta-proyecto-de-generacion-de-energia-undimotriz-en-puerto-antofagasta/>
- Rudick, Y. (2018). Eco Wave Power Wave Energy Power Station Gibraltar. Septiembre 25 de 2019, de THETYS Sitio web: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/eco-wave-power-wave-energy-power-station-gibraltar>
- Saavedra, M.A. (2017). Generación eléctrica en Colombia. Agosto 10 de 2019, de El Mundo Sitio web: <https://www.elmundo.com/noticia-/Generacion-electrica-en-Colombia-esta-holgada-ante-la-demanda/357381>
- Tacoronte, Y. (2011). Escocia contará con una planta de energía undimotriz de 2,4 MW. Septiembre 28 de 2019, de Energías Renovables Sitio web: https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/escocia
- Tirenti, J. (2019). Recipientes a presión: Diseño de equipos a presión. Mayo 02 de 2020, de Training Projects Connecting Dots Sitio web:
<https://arvengtraining.com/wp-content/uploads/2016/07/PVII-NOTAS-DE-ESTUDIO-PRUEBA.pdf>
- Wavestar. (2019). Máquina de energía undimotriz. Septiembre 30 de 2019, de Wavestarenergy Sitio web: <http://wavestarenergy.com/>

Wavestar energy. (2004). Wave power apparatus having a float and means for locking the float in a position above the ocean surface. Septiembre 30 de 2019, de Patents justia Sitio web: <https://patents.justia.com/patent/-7579704>

Wisuki. (2019). widgets. 2019, de Wisuki Sitio web: Google Maps. octubre 03 de 2019. Coordenadas Geográficas. 2019, de Google Maps Sitio web: <https://www.coordenadas-gps.com/>

Wordpress. (2014). Energías de las olas undimotriz. Septiembre 12 de 2019, de Wordpress Sitio web: <https://triplep97.wordpress.com/energia-de-los-oceanos/energia-de-las-olas-undimotriz/>