

SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL MAR DE LIMA

ELECTRICITY GENERATION SYSTEM THROUGH THE USE OF WAVE ENERGY IN THE SEA OF LIMA

Sergio M. Bustinza Gutiérrez¹, Guiovani A. Gastañaga Bayarri²

RESUMEN

En este estudio se tiene como finalidad determinar el potencial energético undimotriz en la costa del litoral peruano en la región Lima del Perú. Al ser este tipo de energía recientemente estudiada sobre todo en el Perú se tiene información reducida se hace uso de otros artículos que se han encargado de investigar la energía undimotriz. Primero, se han delimitado las zonas en las que se va a investigar teniendo playas como La Pampilla y Cerro Azul. Segundo, para determinar el potencial energético de las olas se tiene en cuenta dos variables fundamentales las cuales son la altura y el periodo de una onda que representa a la ola. Las variables se pueden encontrar en la base de datos de diferentes webs que se dedican a mostrar el oleaje. Luego de determinar el potencial muestra los meses de mayor frecuencia de olas que tienen una altura significativa alta, estos son los meses entre mayo y agosto. Tercero, se ha determinado ciertos métodos de captación de esta energía undimotriz para convertirla en energía eléctrica; comparándolas entre sí se elige el mejor método que podría ser aplicado en las costas peruanas. Finalmente se propone un diseño inventado e innovador por parte de los autores el cual se compara de manera cualitativa, demostrando que el diseño capta muchas variables a tener en cuenta como la dirección de las olas y así lograr aprovechar el impacto de estas para generar mayor energía eléctrica.

Palabras claves: Potencial, energía, undimotriz, litoral, ola, eléctrica, captación.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the wave energy potential on the Peruvian coastline in the Lima region of Peru. Being this type of energy recently studied, especially in Peru, there is little information, other articles that have been in charge of investigating wave energy are used. First, the areas in which it is going to be investigated have been delimited, having beaches such as La Pampilla and Cerro Azul. Second, to determine the energy potential of the waves, two fundamental variables are considered, which are the height and the period of a wave that represents the wave. The variables can be found in the database of different websites that are dedicated to showing the waves. After determining the potential, it shows the months with the highest frequency of waves that have a significant height, these are the months between May and August. Third, certain methods of capturing this wave energy to convert it into electrical energy have been determined; Comparing them with each other, the best method that could be applied on the Peruvian coast is chosen. Finally, an invented and innovative design by the authors is proposed, which is compared qualitatively, demonstrating that the design captures many variables to consider such as the direction of the waves and thus be able to take advantage of their impact to generate more electrical energy.

Key Words: Potential, energy, wave power, coastline, wave, electric, catchment.

¹ Estudiante del noveno ciclo de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma. Egresado de la carrera técnica profesional Electrónica y Automatización Industrial de Tecsup. Email: sergio.bustinza@urp.edu.pe

² Estudiante del noveno ciclo de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma. Conocimientos en robótica, diseño gráfico y CAD. Email: guiovani.gastanaga@urp.edu.pe

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global la demanda energética va aumentando conforme al avance tecnológico-industrial y el incremento demográfico. La energía eléctrica se genera de diferentes formas, entre las más comunes y que se han usado a lo largo de la historia se tiene a los combustibles fósiles, que producen e incrementan la contaminación ambiental, y, al ser un recurso no renovable, escasean con el paso del tiempo.

El Perú no es ajeno al aumento de la demanda energética, en los últimos 10 años se ha incrementado en un 44.15%. En donde la mayor fuente de para la producción de electricidad es la energía hidroeléctrica siendo el 55.9%. Seguido se encuentra el gas natural con el 36.3%. (MINEN, 2020).

El litoral peruano cuenta con una vasta extensión y las corrientes que lo recorren dan lugar a importantes efectos sobre el mar. Asimismo, los exuberantes vientos traen consigo intensas olas que rompen sobre las costas. De esta manera, se presume el colosal potencial energético que yace en el mar del Perú. Este estudio se centra específicamente en la determinación del poder de las olas, que a posteriori podría ser explotado para la generación de electricidad.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Este tipo de turbinas está innovando la industria de la energía a mediana escala, otorgando óptimos y valiosos resultados en medios fluviales. Además, el escaso impacto ambiental que generan es sumamente destacable, lo que las identifica como un medio seguro y eficiente de producción.

Lima es una ciudad con una gran amplitud de costas, que actualmente cuenta con una incrementada demanda eléctrica que se sirve casi en su totalidad de fuentes convencionales. Las nuevas vías de generación eléctrica, como los sistemas de aprovechamiento undimotriz en algunas de sus formas, están rezagadas dentro de las alternativas a las convencionales fuentes de explotación.

Para 2015, según Osinergmin, el consumo de energía eléctrica en Lima representaba alrededor de 18,6 GWh, casi un 50% del consumo total peruano (39,8%) (p.227). Asimismo, según este mismo organismo, de la potencia total instalada a nivel nacional (10 718 MW), 4 976 MW —prácticamente la mitad— corresponde a la potencia instalada en Lima (p. 235). Toda esa generación de energía se reparte fundamentalmente entre fuentes de producción hidroeléctrica y fuentes térmicas que abastecen tanto servicios dentro del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional como a los Sistemas Aislados.

1.2.1 Problema general:

- ¿El tornillo de Arquímedes es un sistema de alto rendimiento para el aprovechamiento de energía undimotriz?

1.2.2 Problemas específicos:

- ¿Las fuentes de producción de energía eléctrica actuales y las potencias instaladas en la red son suficientes para abastecer la demanda energética en la ciudad de Lima?
- ¿Es aprovechable la energía undimotriz para la generación de electricidad en la costa de Lima?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar y elaborar un sistema de generación eléctrica basado en el tornillo de Arquímedes para aprovechar la energía undimotriz en la costa de Lima.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar las fuentes de producción actual y las potencias instaladas que abastecen la demanda eléctrica en la ciudad de Lima.
- Identificar el aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa de Lima utilizando la turbina de Arquímedes.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.1.1 Nacional:

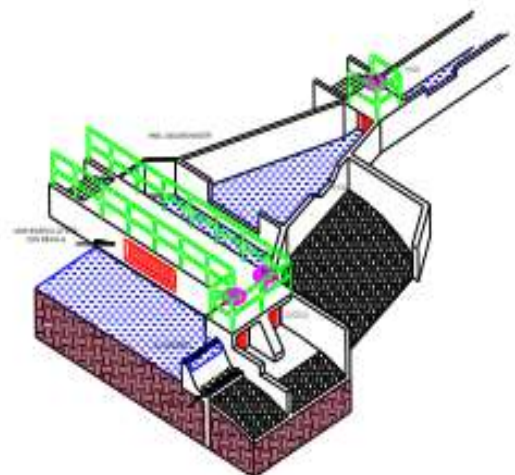
Algunos antecedentes se adjudican al ingeniero peruano Fernando Escajadillo, quien diseñó un sistema mecánico y eléctrico de generación undimotriz. Su sistema es una aplicación a escala intermedia instalada en la costa. Los resultados de su implementación han corroborado la factibilidad económica y sustentable del producto.

Este sistema se basa en las centrales tipo TAPCHAN, aunque con una reconfiguración de diseño que lo hace adaptable a cualquier entorno costero. Como argumenta Escajadillo (2018), esta tecnología cuenta con dos ductos, uno de impulsión de agua y otro de encapsulamiento, que conducen el fluido hacia un sistema de válvulas para producir energía potencial a partir del movimiento.

La zona en la que se realiza el estudio y trabajo es en las cercanías de la playa Mollendo, ahí se realiza una topografía marina para obtener datos de las pendientes marinas. Cuando el agua llega a su cota superior, se deposita en un conjunto de desarenadores para la eliminación de sedimentos, seguido el agua se dirige hacia una cámara de carga, de tal manera que sirve como agua de retención para evitar golpes de ariete y así proporcionar un caudal regular a la tubería forzada. Esta tubería se bifurca para alimentar a las dos turbinas Kaplan, dando cada una la potencia firme de 6.67 MW. Finalmente, el agua pasa a un tubo de aspiración, aquí es donde el agua marina es devuelta al mar.

Figura 1

Desarenador y salida de agua del sistema undimotriz



Nota. Este sistema en teoría podría producir hasta 6.67 MW.

2.1.2 Internacional:

Renewable Ocean Energy:

Es un proyecto desarrollado por un conglomerado de empresas multinacionales: el Clúster Marítimo y Logístico de las Islas Baleares, la UIB, Renewable Ocean Energy, Sunwa Technologies y la Federación Española de Empresarios del Mar, y la cooperación académica de la Universidad de las Islas Baleares. El sistema implementado consiste en un sistema bamboleante que oscila con el movimiento de las olas que rompen en la costa. Este efecto impulsa una serie de turbinas que producen electricidad.

Figura 2

Tecnología de producción eléctrica a partir de la energía de las olas de Eco Wave Power



Nota. Este sistema en teoría podría producir hasta 2 MW de energía y abastecer a aproximadamente 400 hogares. Tomado de EcoInventos, 2022, <https://ecoinventos.com/primer-central-undimotriz-spain/amp>

En términos cuantitativos, este sistema ha podido producir entre 15 kWh y 25 kWh por unidad. Estos dispositivos son capaces de operar con apenas columnas de olas de medio metro de altura. Como recoge El Periódico de la Energía (2022), los técnicos del proyecto ROE precisan que en la actualidad no existe una tecnología equiparable rendimiento y coste, que con 100 metros cuadrados de turbinas es posible obtener la electricidad de 1.200 metros cuadrados de paneles fotovoltaicos.

Parque undimotriz en China del Instituto de Conversión de Energía Guangzhou:

Este parque es un proyecto instalado en 2017 en Wanshan (China), financiado y construido por el Instituto de Conversión de Energía de Guangzhou (GIEC) de la Academia de Ciencias (CAS). Su sistema genera, según las mediciones, hasta 1 MW de energía.

Figura 3

Primera unidad de 500 kW "Zhoushan"



Nota. Ensayo con éxito en mar abierto en 2020 del dispositivo. Recuperado de "WAVE ENERGY DEVELOPMENTS HIGHLIGHTS" (p.6), por Ocean Energy Systems, 2021, *OES Brochures*, 1.

Generador undimotriz UniWave200:

En 2021, el Wave Swell Energy (WSE) construyó el sistema generador de energía undimotriz UniWave200 en la isla King de Tasmania. Este proyecto desarrolla hasta 200 kW de potencia y puede proporcionar energía satisfactoriamente a la comunidad.

El generador es clasificado como un sistema del tipo columna de agua oscilante, que aprovecha las constantes diferencias de presiones generadas por la dinámica undimotriz que impulsan masas de aire encapsuladas. El movimiento del aire propulsa un sistema de turbinas generadoras de electricidad.

Figura 4

Generador de energía undimotriz UniWave200



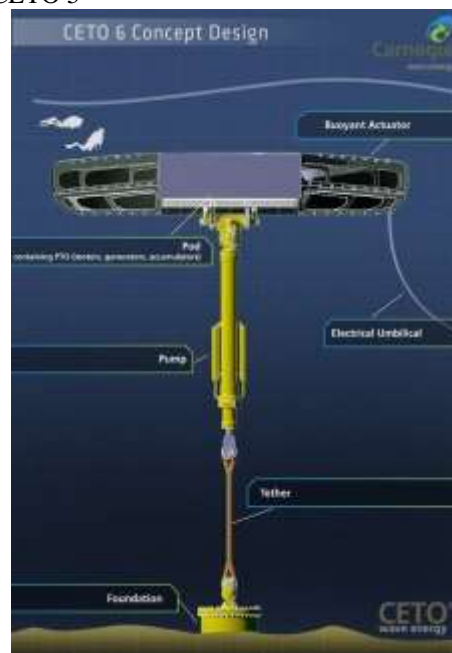
Nota. Este dispositivo aprovecha las corrientes de aire que generan el bamboleo continuo de las olas para impulsar unas turbinas generadoras de energía eléctrica. Recuperado de "WAVE ENERGY DEVELOPMENTS HIGHLIGHTS" (p.8), por Ocean Energy Systems, 2021, *OES Brochures*, 1.

Sistema CETO 6:

Este sistema es de los más innovadores y eficientes, al operar en grandes profundidades y evitar las considerables pérdidas de energía undimotriz. Es parte de un proyecto de producción eléctrica limpia y eficiente desarrollado en Australia, que ha logrado ser la fuente de abastecimiento de la principal base naval del país.

Figura 5

Sistema CETO 5



Nota. El movimiento oscilatorio de las olas induce una especie de movimiento pendular en este dispositivo, lo que propicia la transformación de esa energía mecánica en energía eléctrica. Tomado de EcoInventos, 2019.

Mocean Energy:

Es un proyecto a cargo de Wave Energy Scotland's Novel Wave Energy Converter de generación undimotriz a grandes profundidades. Esta empresa de origen escocés ha desarrollado su prototipo Blue X para ser sometido a pruebas en Orkney, Escocia, y así producir energía de consumo a corto plazo.

Figura 6

Dispositivo undimotriz para proveer de energía a equipos destinados a la extracción de petróleo y gas submarino



Nota. Este dispositivo aprovecha las corrientes de aire que generan el bamboleo continuo de las olas para impulsar unas turbinas generadoras de energía eléctrica. Recuperado de "WAVE ENERGY DEVELOPMENTS HIGHLIGHTS" (p.18), por Ocean Energy Systems, 2021.

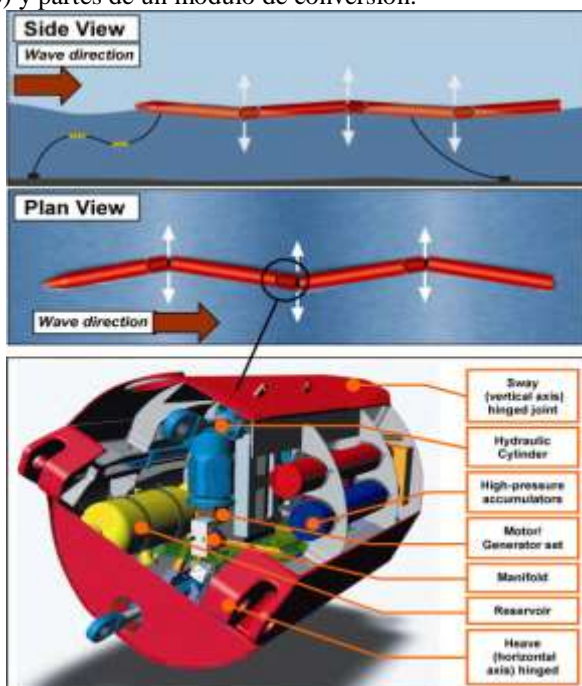
El sistema es un dispositivo articulado que se mueve según y paralelamente a la dirección de las ondas. El movimiento sobre una bisagra articulada efectúa el impulso suficiente para hacer girar una turbina generadora de electricidad. Asimismo, este dispositivo adopta sistemas de inteligencia artificial y control para optimizar su rendimiento de operación.

Pelamis Wave Power

El Pelamis tiene un mecanismo atenuador, este opera semi sumergido. Tiene 4 secciones tubulares, las cuales van conectadas por 3 rótulas, denominadas módulos de conversión, su movimiento es provocado por el oleaje a lo largo de su estructura y se convierte en energía eléctrica gracias al sistema óleo-hidráulico de alta presión. Luego, la electricidad producida por los motores hidráulicos se conduce a través de un cable que se encuentra en el fondo marino, enviando así energía producida por varios dispositivos a la costa.

Figura 8

Diagramas de funcionamiento Pelamis (Vista aérea y vista de lado) y partes de un módulo de conversión.



Fuente: Pelamis Wave Power.

2.2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.2.1 Dinámica undimotriz

A. CONCEPTUALIZACIÓN:

Las olas son ondulaciones que se producen principalmente por la acción de arrastre del viento sobre la superficie del mar. Las olas del mar pueden verse influenciadas por otras fuerzas, como la gravedad, el efecto Coriolis o la actividad tectónica. Las olas conforme se desplazan longitudinalmente arrastran partículas de agua que se montan unas sobre otras en un movimiento oscilante; la superficie del mar es la superposición de múltiples trenes de olas que describen este movimiento y que interfieren entre sí, anulando o reforzando su comportamiento.

Figura 9

Movimientos circulares, de traslación, de ascenso y descenso que describen las partículas del agua.



Fuente: <http://www.masmar.net/index.php/esl/Apuntes-N%C3%A1uticos/Oceanograf%C3%ADa/Olas.-Formaci%C3%B3n>

B. CLASIFICACIÓN:

Estacionarias:

Se producen por acción del viento o por tectonismo submarino y pueden ser entendidas como sacudidas que yacen en la superficie marina.

Transitorias:

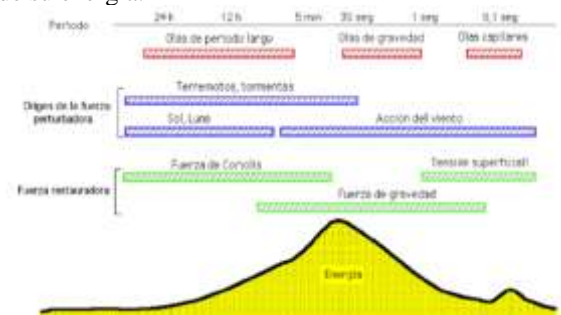
Se producen superficialmente por influencia del viento o en el seno oceánico como olas internas por gradientes de temperatura y salinidad.

Libres:

Son olas que se desarrollan libremente y que se producen por la acción de una fuerza perturbadora que se detiene inmediatamente.

Figura 10

Diferentes tipos de olas clasificadas según periodo, fuerza perturbadora, fuerza restauradora y la distribución de su energía.



Fuente: Castillo, Carlos.

C. CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA:

Ondas teóricas:

Estas pueden ser entendidas como olas en condiciones ideales.

Figura 11

Parámetros onda



Fuente: Normas técnicas hidrográficas N° 080 - Dirección de Hidrografía y Navegación

En donde la diferencia de altura entre la cresta y el valle viene a ser la altura de la ola (H)—la amplitud es la mitad de la altura—, la longitud de onda (λ) está marcada por la diferencia entre las dos crestas consecutivas; T es el periodo de la onda, que viene a ser el tiempo que una onda tarda en recorrer toda su longitud (Muñoz, 2017), esta se expresa en segundos y la frecuencia viene a ser el inverso del periodo, este se representa en Hertz (Hz). Luego tenemos la primera ecuación de la frecuencia angular (1), donde π es una constante matemática aproximadamente igual a 3,1416:

$$\omega = 2\pi/T \quad (1)$$

El siguiente parámetro de la onda es la velocidad de fase (2), siendo esta la velocidad con la que se mueve la onda.

$$c = \lambda/T \quad (2)$$

Ahora se mostrará diferentes ecuaciones para la velocidad de onda dependiendo de la profundidad del agua que está representado en la figura 14:

Figura 12

Profundidad de agua con respecto a las olas.



Fuente: Normas técnicas hidrográficas N° 080 - Dirección de Hidrografía y Navegación

Esta velocidad de fase cambia en relación con la profundidad del mar sobre la cual pasan las olas (3). Para aguas profundas, la profundidad es mayor a la mitad de la longitud de onda, y la velocidad de fase es

$$c = g/2\pi T \quad (3)$$

Para aguas poco profundas (0-10 m), donde la profundidad del mar es menor a 1/20 la longitud de la

onda (o la longitud de la onda multiplicada por 0,05), siendo g la fuerza de gravedad (9,80665 m/s²), la velocidad de fase en aguas poco profundas es igual a

(4)

Cuando la prof $c = \sqrt{gH}$ es mayor a la mitad de la longitud de onda, es decir, es mayor a 0,05 por la longitud de la onda las aguas se consideran intermedias (10-200 m), la fórmula de la velocidad de fase de una ola es:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kH)} \quad (5)$$

Donde k es el número de onda.

La velocidad de las partículas de agua puede aproximarse mediante la siguiente ecuación (Hurtado, 2017):

$$v = \frac{\pi H}{T} e^{kx} \quad (6)$$

v : Velocidad de las partículas de agua

x : Posición en el tiempo de las partículas de agua

D. POTENCIAL UNDIMOTRIZ:

La energía que almacenan las olas depende de la intensidad del viento, el tiempo y la distancia de soplado en una misma dirección. Las olas almacenan fundamentalmente tres tipos de energía: la energía potencial, que se acumula con la altura de las olas; la energía cinética, que se compone de la velocidad que alcanzan; y la energía hidráulica.

En un oleaje idealizado, en el cual la altura y el periodo de las olas es constante, la energía de las olas puede calcularse utilizando la siguiente fórmula (Duckers, 1992).

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (7)$$

Dónde:

P: Potencia (W)

ρ : Densidad del agua (agua salada del mar): 1.025 kg/m³

g: Gravedad (9.80665 m/s²)

T: Periodo de la ola (s)

H: Altura promedio de la ola (m)

Sin embargo, el típico estado del mar está generalmente compuesto por olas que poseen diferentes alturas, periodos, y direcciones. Para un mar irregular, la energía total promedio que se encuentra en las olas se calcula (Muñoz, 2017).

$$P = k H_s^2 T_e \quad (8)$$

La variable k es una constante que viene dada por la siguiente ecuación (McCormick & Ertekin, 2008):

$$K = \frac{\rho g^2}{64\pi} \quad (9)$$

Cómo ρ y g ya son conocidos, también que es una constante matemática de valor aproximado a 3.1416. Entonces el valor de k, siendo variable constante, basta con reemplazar el valor obtenido de k y reemplazarlo para que la ecuación de la potencia de frente de ola quede de la siguiente manera:

$$P = 490.27 H_s^2 T_e [W/m] \approx 0.49 H_s^2 T_e [kW/m] \quad (10)$$

Donde P es el potencial de energía que fluye en una ola y está

expresado en kW/m, los datos como Hs representa a la altura significativa de la ola y Te al período en segundos.

La altura significativa Hs es la altura promedio del tercio de olas más altas dentro de un grupo de olas considerado. Los mares reales contienen olas que poseen alturas, periodos y direcciones aleatorios. Dentro de un corto periodo de tiempo, las características de los mares reales permanecen constantes, componiéndose así de un estado del mar (Stock-Williams, & Gunn, 2016).

2.2.2 Tornillo de Arquímedes:

El tornillo de Arquímedes es considerado una de las primeras máquinas hidráulicas. También se la conoce como máquina gravimétrica la cual se compone de una superficie con hélices helicoidales dentro de un cilindro cuyo eje está inclinado de tal modo que su extremo inferior está sumergido dentro del agua. El cilindro y la hélice helicoidal forman una serie de celdas de manera que el agua desciende o asciende de acuerdo al sentido en la cual está colocado el Tornillo.

Figura 13

Bomba basada en el tornillo de Arquímedes



Nota. Recuperado de Nuernbergk y Rorres, 2013.

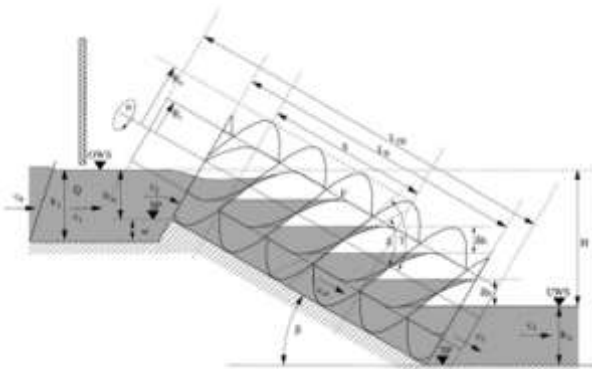
2.2.3 Principio de funcionamiento del tornillo de arquímedes:

La turbina basada en el tornillo de arquímedes tiende a moverse o funcionar por la aplicación de una fuerza externa, por ejemplo, en una pendiente donde el agua cae, la turbina girará debido a la fuerza con la que el agua cae, es por eso que a este dispositivo se le conoce como máquina gravimétrica.

Detalladamente se puede explicar que el agua llena las cavidades del tornillo, estas son las distancias entre las hélices helicoidales que se encuentran en el eje del tornillo. De esta manera, se convierte la energía potencial en energía mecánica que al ser acoplado de forma directa o indirecta con un generador se puede obtener energía eléctrica.

Figura 14

Vista de corte del tornillo



Nota. Recuperado de Nuernbergk y Rorres, 2013.

Diseño óptimo de un tornillo de arquímedes:

La fórmula general para obtener la energía potencial de cualquier sistema se presenta en la ecuación 11.

$$P = \rho g E Q H \quad (11)$$

A partir de ahora se van a mencionar letras que representan una posición de la figura 17.

La potencia P se obtiene en vatios (watts), E corresponde a la eficiencia hidráulica de la turbina, normalmente se encuentra entre el 80% y 90%; ρ es la densidad del agua; g, la aceleración gravitacional; Q, el caudal efectivo que pasa a través de la turbina; y H, la cabeza hidráulica (Wickham y Kilkenny, 2010).

El radio interno Ri corresponde a la sección del tubo, Ra al radio externo Ra que abarca e incluye el ancho de las hojas instaladas sobre el eje. La región que se encuentra entre dos hojas sucesivas del tornillo se conoce como un "balde". Un tornillo con N número de hojas tendrá una cantidad N de baldes, en donde existe un espacio S que corresponde a la distancia que se describe cuando la punta de cada hoja completa un revolución o rotación (Nuernbergk y Rorres, 2013).

Cada balde corresponde a una región del tornillo que se llena al máximo de agua que llega al punto de llenado óptimo F, de manera que el volumen de llenado óptimo que fluye dentro y fuera del tornillo con cada rotación del sistema corresponde a Vu y se describe en la ecuación 12.

$$V_U = \pi (R_a^2 - R_i^2) S \quad (12)$$

El caudal que puede llevar cada balde al punto de llenado óptimo F es el único en el flujo que puede generar efectivamente un torque, se puede inferir que la suma de cada volumen de llenado en los baldes Vu es la única energía hidráulica en el sistema que puede ser transformada directamente en energía rotacional (Nuernbergk y Rorres, 2013). Este caudal se conoce como Qw se puede describir con la ecuación 3, en m³/s.

$$Q_w = \frac{n}{60} V_U \quad (13)$$

La variable n corresponde a la velocidad rotacional del tornillo expresada en min⁻¹, y a su vez representa la magnitud máxima que puede alcanzar (Muysken, 1932).

$$n \leq \frac{50}{(2R_a)^2} \quad (14)$$

El volumen óptimo de llenado Vu determina cuatro parámetros adimensionales, que corresponden a la relación entre el radio interno y el externo ρ , la relación del periodo con respecto al radio externo y pendiente λ , la tasa entre cada volumen de balde Vu, y la tasa de volumen descrito por cada rotación λV_U .

$$\rho = \frac{R_i}{R_a} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{S(\tan\beta)}{2\pi R_a} \quad (16)$$

$$v_U = \frac{V_U}{\pi R_a^2 S} \quad (17)$$

$$\lambda v_U = \frac{V_U(\tan\beta)}{2\pi^2 R_a^2} \quad (18)$$

El número N de hojas instaladas en el sistema determina el valor óptimo para los parámetros adimensionales, esto va a ser un dato importante para el diseño del tornillo de arquímedes.

Se puede obtener la ecuación que describe el comportamiento del caudal en el torque Qw, esto debido a las ecuaciones que

corresponden a los parámetros adimensionales descritos por Rorres (2000), donde:

$$(19)$$

Además, se debe tener en cuenta que el flujo que se describe por el borde circular del tornillo y el recubrimiento que lo contiene, puede perderse, dependiendo del diseño estructural y su resistencia al impacto del flujo. El caudal de derrame Q_G puede ser representado por la ecuación 20.

$$Q_G = \mu_A s_{sp} R_a \left(1 + \frac{s_{sp}}{2R_a}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{s_{sp}}{2R_a}\right)^2} \left(\frac{2}{3}\alpha_1 + \alpha_2 + \frac{1}{3}\alpha_3\right) \sqrt{2g(\delta h)} \quad (20)$$

En la ecuación 20, el valor s_{sp} se refiere al máximo espacio que puede haber entre el recubrimiento y las hojas, este depende del peso total del tornillo y el grosor de los materiales. El valor de μ_A es el factor del coeficiente de descarga en la zona a evaluar, normalmente se encuentra entre 0.65 y 1.00. Por último, el valor δh corresponde a la diferencia en cabeza hidráulica que existe entre cada balde.

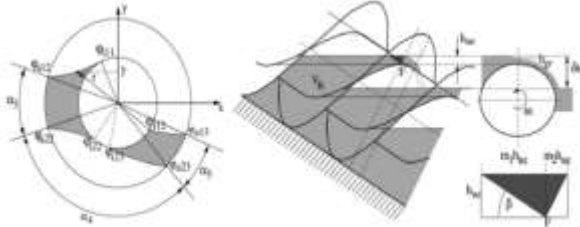
$$(21)$$

$$s_{sp} = 0.0045 \sqrt{2R_a} \quad (22)$$

Los ángulos α_1 , α_2 , y α_3 (figura 17), definen la corriente de derrame de Q_G , y fueron determinados por Rorres (2000). Los valores que se obtienen son estandarizados por la investigación previa de Rorres y estos valores son respectivamente 0.478 rad, 2.338 rad, y 0.358 rad.

Figura 15

Izquierda: Ángulos de derrame. Derecha: Vista en planta del volumen de llenado óptimo



Nota. Recuperado de Nuernbergk y Rorres, 2013.

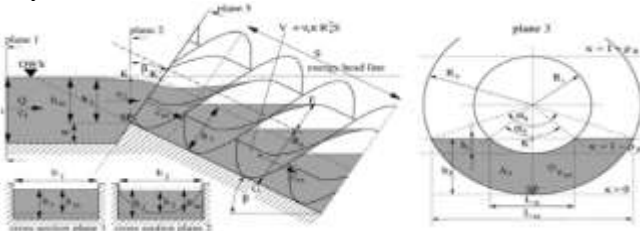
La suma del caudal de derrame junto con el caudal de torque determina el caudal total que debe entrar al tornillo, y se debe regular en el sistema.

$$Q_T = Q_W + Q_G \quad (23)$$

Una vez obtenido el caudal óptimo que debe ser utilizado por el sistema, se debe determinar la cabeza del flujo de entrada.

Figura 16

Esquema de cabeza de entrada



Nota. Recuperado de Nuernbergk y Rorres, 2013.

Un caudal determinado es llamado Q , este entra al sistema, además cuenta con una altura h_1 igual al radio externo del tornillo. El nivel del agua baja en la entrada al tornillo debido a

que aumenta la velocidad del flujo y se denota a esta altura h_2 . Para establecer la cabeza de entrada h_{in} como se observa en la figura 18, se determina un modelo analítico para la profundidad representada en h_2 (Nuernbergk y Rorres, 2013).

El caudal puede ser aproximado bajo condiciones estables de acuerdo con un flujo uniforme de altura h_3 y una velocidad axial C_{ax} , para que se considere a A_3 como el área transversal del agua en el interior del tornillo.

Es posible aproximar el valor de un volumen adimensional que representa la cantidad total de agua captada por los caudales de derrame y torque V_T .

$$V_T = \frac{A_3}{\pi R_a^2} \quad (24)$$

Haciendo uso de una aproximación de la altura adimensional κ , que corresponde a la relación que existe entre el radio externo del tornillo y h_3 , se encuentra que:

$$(25)$$

Hay 3 casos de compo $\kappa = \frac{h_3}{R_a}$ mediante los cuales el nivel del agua interactúa con el tornillo. El primer caso se presenta cuando el nivel del agua se encuentra debajo del tubo central del tornillo:

$$v_T = \frac{\alpha_8}{2\pi} - \frac{1-\kappa}{\pi} \sqrt{1 - (1-\kappa)^2} \quad (26)$$

El segundo caso sucede cuando el nivel del agua corta el tubo central:

$$v_T = \frac{\alpha_8 - \alpha_9 \rho^2}{2\pi} - \frac{1-\kappa}{\pi} \left[\sqrt{1 - (1-\kappa)^2} - \sqrt{\rho^2 - (1-\kappa)^2} \right] \quad (27)$$

El tercer caso surge bajo la suposición de que el nivel de agua supera el tubo central:

$$v_T = \frac{\alpha_8}{2\pi} - \rho^2 - \frac{1-\kappa}{\pi} \sqrt{1 - (1-\kappa)^2} \quad (28)$$

Los ángulos α_8 y α_9 están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_8 = 2 \arccos(1 - \kappa) \quad (29)$$

$$\alpha_9 = 2 \arccos\left(\frac{1-\kappa}{\rho}\right) \quad (30)$$

Luego se determina el valor de h_3 para establecer la altura h_2 , asumiendo que la cabeza en h_2 es una proyección del nivel del agua del interior del tornillo.

$$h_2 = h_3 \cos \beta \quad (31)$$

Mediante la ecuación de Bernoulli, se determina el valor de la cabeza de entrada h_1 , siempre teniendo en cuenta el factor de pérdidas hidráulicas ζ y las velocidades de flujo en cada plano C_1 y C_2 .

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2g} = w + h_2 + \frac{c_2^2}{2g} (1 + \zeta) \quad (32)$$

El factor de pérdidas hidráulicas ζ se estima con la ecuación de pérdidas de cabeza hidráulica cuando el agua pasa de un canal rectangular a la circular.

$$\zeta = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 = \left(\frac{v_T \pi R_a}{\kappa \cos \beta b_2} - 1\right)^2 \quad (33)$$

Finalmente, se halla el valor del nivel de cabeza hidráulico que entra al tornillo h_{in} sabiendo que el caudal entra al sistema, entonces $Q = C_1 b_1 h_1 = C_2 b_2 h_2$ y $b_1 = b_2$.

$$h_{in} = h_1 - w = h_2 + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{h_2 b_2}\right)^2 \left[1 + \zeta - \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2\right] \quad (34)$$

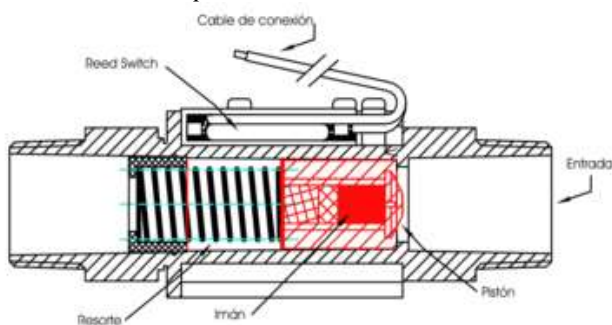
2.2.4 Sensores de caudal:

Los sensores de caudal son dispositivos que miden el volumen y velocidad de agua que pasa por una sección o tubería.

a) Sensor de caudal de pistón

Figura 17

Sensor de caudal de pistón.



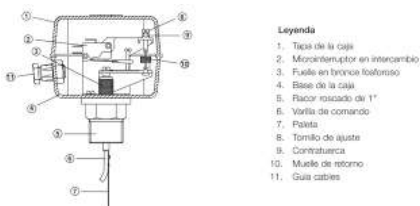
Nota. Recuperado de:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8f/FSpiston.png/400px-FSpiston.png>

b) Sensor de paleta (compuerta)

Figura 18

Sensor de paleta o de compuerta.

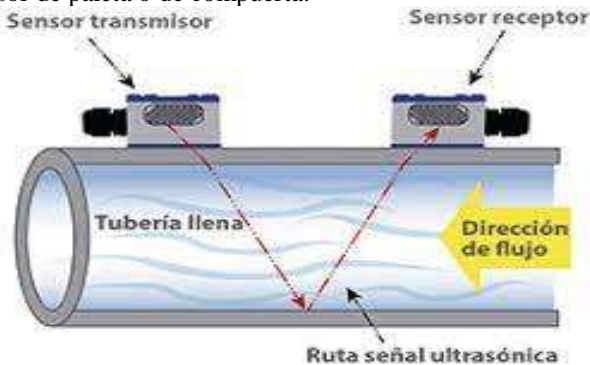


Nota. Tomado de <https://cloudtec.pe/sensores-de-flujo/319-switch-de-flujo-agua-paleta-flu25pl.html>

c) Ultrasónico

Figura 19

Sensor de paleta o de compuerta.



Nota. Tomado de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3217&ni=medicion-de-flujo-por-ultrasonido>

2.2.5 Controlador lógico programable

Es una computadora de tipo industrial con aplicaciones en el control de procesos y la automatización. Su función es controlar máquinas y recibir señales para efectuar procesos. Son dispositivos bastante fiables y precisos en el control de señales, capaces de ser reprogramados usando una interfaz y lenguajes de alto nivel. Son aptos para desarrollar tareas de forma continua y para interconectar sistemas dentro de un proceso.

Figura 20

PLC de la serie LOGO SIEMENS.



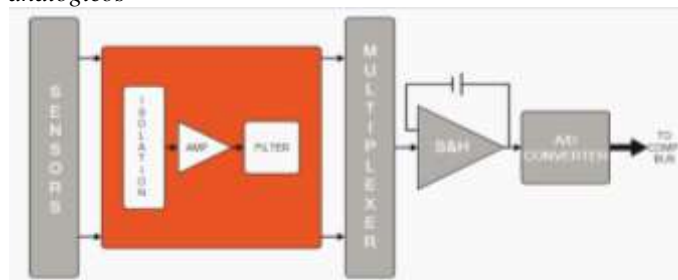
Nota. <https://www.electricalchile.cl/imgmainlogo.png>

2.2.6 Adquisición de datos (DAQ):

El objetivo principal del sistema de adquisición de datos es adquirir y almacenar datos. Pero también se supone que proporcionan visualización y análisis de datos después de la grabación y en tiempo real. Además, la mayoría de los sistemas de adquisición de datos tienen capacidades integradas de informes y análisis.

Figura 21

Un esquema completo de un sistema de adquisición de datos analógicos



Nota. Recuperado de <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-adquisicion-de-datos>

Los elementos que componen un sistema de adquisición de datos son circuitos de acondicionamiento de señales, convertidores A/D o D/A, memorias y procesadores de datos.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS:

Fuente de energía

Recurso que a partir de su explotación puede ser aprovechado para la obtención de algún tipo de energía, que pueda servir para fines comerciales o no comerciales.

Energía undimotriz

Es la energía mecánica que procede del movimiento dictado por las olas del mar, es una de las energías renovables con mayor expectativa de cara al futuro.

Turbina hidráulica

Máquina a través de la cual se transmite agua, lo que impulsa un sistema de álabes, hélices o palas, generando en el proceso energía cinética de rotación. Suelen acoplarse a otros dispositivos, como máquinas generadoras de electricidad, que transforman esa energía en otro tipo aprovechable o en

transporte de masa.

Tornillo de Arquímedes

Es una turbina gravimétrica de configuración helicoidal inventada por Arquímedes en el siglo III a.C. Consiste en un eje dotado de hélices dispuesto sobre un plano inclinado que permite el transporte de materia, como, por ejemplo, agua. Se utiliza para el transporte de materiales, el bombeo de fluidos y la generación de energía. (Instrumentos de Medición, 2021).

Demanda energética

Es la cantidad de energía que conforma las necesidades de satisfacer las actividades de los hogares, empresas e industrias. Existe una relación directa entre la demanda energética y las actividades económicas, dependencia que se observa evidentemente cuando se habla de demanda eléctrica, por lo que la demanda eléctrica difiere de país en país (Twenergy, 2019).

Potencia instalada

Capacidad para producir la energía que abastece la demanda en un determinado hogar, ciudad o país. Una óptima potencia instalada evitará interrupciones en el suministro energético, cubriendo adecuadamente la demanda energética.

Rendimiento energético

También llamado eficiencia energética, es el cociente entre la energía resultante o eficaz y la energía de suministro, es decir, es la relación que establece cuánta energía consumida se transforma en energía aprovechable. Como enuncia la empresa tecnológica Greendok, un sistema de alto rendimiento energético implica reducción de costos, sostenibilidad y mejoras en la competitividad (Greendok, 2014).

2.4 MARCO METODOLÓGICO

2.4.1 Tipo y Diseño de Investigación

- Experimental.
- Prospectivo.
- Transversal.

2.4.2 Población y muestra

Para el presente proyecto de investigación tendremos como muestra poblacional la demanda eléctrica en la costa de Cerro Azul.

2.4.3 Formulación de la hipótesis

Mediante el diseño de un Sistema de generación undimotriz se suministra la demanda de energía eléctrica a los poblados de Cerro Azul y La Pampilla.

2.4.4 Variables-Operacionalización

Variable Independiente:

- Diseño de un sistema de generación undimotriz.
- La demanda energética eléctrica estimada en el poblado de Cerro Azul.
- La energía undimotriz estimada en la costa de Lima

Variable dependiente:

- El rendimiento del sistema de generación eléctrica
- Suministro de energía eléctrica generada

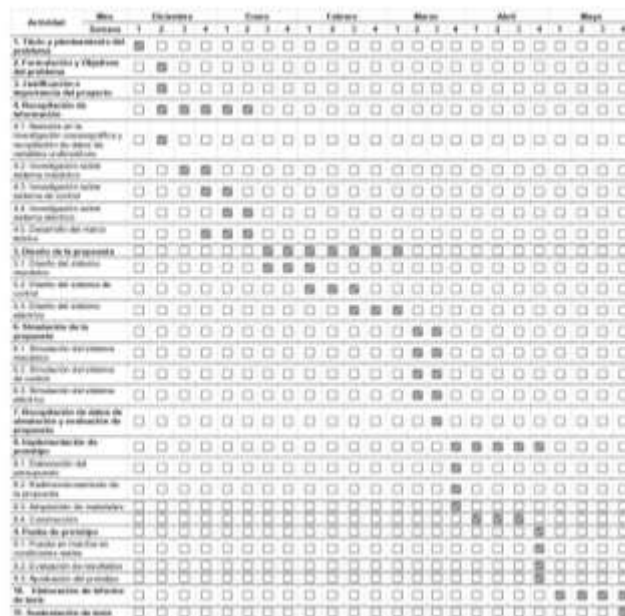
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

3.1. Planeamiento del proyecto

El planeamiento se desarrolla en base a una cronología marcada por una sucesión de pasos que se llevarán a cabo a lo largo de un periodo de seis meses.

Tabla 3

Cronograma del proyecto



Nota. Elaboración propia.

Asimismo, cada actividad será delegada a uno o a ambos integrantes, tal como se indica en el siguiente esquema:

Tabla 4

Delegación de actividades

Actividad	Delegado
1.1. Asesoría en la investigación oceanográfica y recopilación de datos de variables undimotrices	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
1.2. Investigación sobre sistema mecánico	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
1.3. Investigación sobre sistema de control	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
1.4. Investigación sobre sistema eléctrico	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
2.1. Diseño del sistema mecánico	Armando Gastañaga
2.2. Diseño del sistema de control	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
2.3. Diseño del sistema eléctrico	Segio Bustinza
3.1. Simulación del sistema mecánico	Armando Gastañaga
3.2. Simulación del sistema de control	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
3.3. Simulación del sistema eléctrico	Segio Bustinza
4. Recopilación de datos de simulación y evaluación de propuesta	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
5.1. Elaboración del presupuesto	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
5.2. Redimensionamiento de la propuesta	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
5.3. Adquisición de materiales	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
6.1. Puesta en marcha en condiciones reales	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
6.2. Evaluación de resultados	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
6.3. Aprobación del prototipo	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
7. Elaboración de informe de tesis	Armando Gastañaga y Segio Bustinza
8. Sustentación de tesis	Armando Gastañaga y Segio Bustinza

Nota. Elaboración propia.

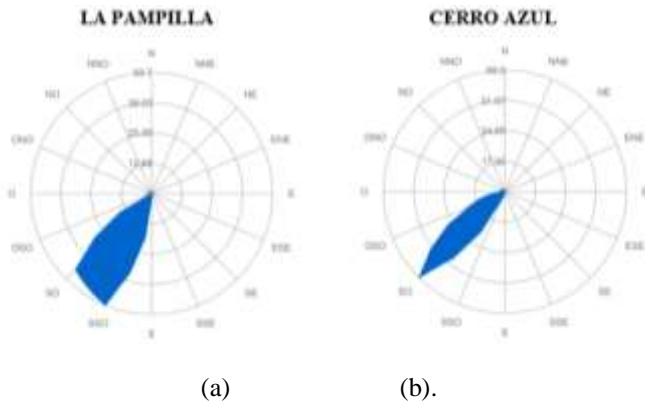
3.2. Ejecución del proyecto

3.2.1. Análisis del potencial undimotriz en las playas Cerro Azul y la Pampilla:

A. DELIMITACIÓN DE ZONA:

Figura 22

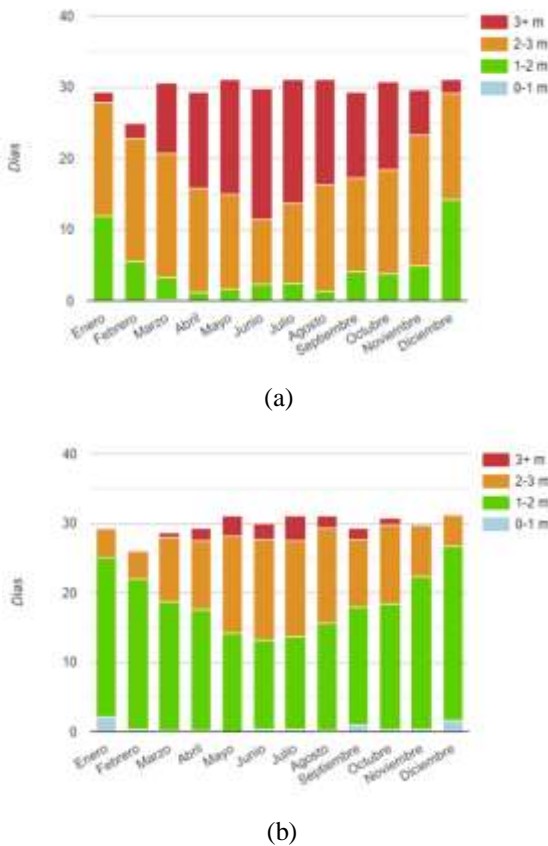
Ola Rosa de la dirección de las olas La Pampilla (a) y Cerro Azul (b)



Nota. Información extraída de la web Wisuki.

Figura 23

Altura de las olas La Pampilla (a) y Cerro Azul (b)



Nota. Información extraída de la web Wisuki.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y CÁLCULOS:

La toma de datos se obtuvo de diferentes fuentes web de predicciones para el oleaje. Entre estas se tiene como

principal a Wisuki y Tablademarea, del primero se obtuvieron los datos para clasificar las playas a tomar, como es la altura de las olas en lo que va del año. De Tablademarea se corroboraron los periodos y alturas de olas para ver si estaban dentro del rango que Wisuki mostraba. Todo se complementa obteniendo así la altura significativa y periodo de zonas delimitadas.

Figura 24

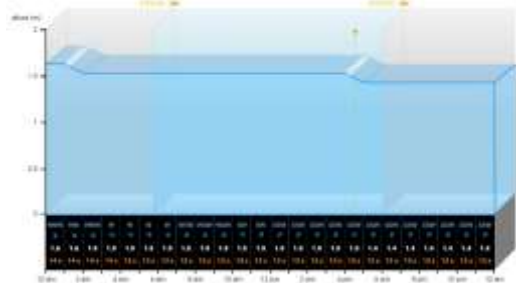
Datos de las olas de La Pampilla y Cerro Azul



Nota. Información extraída de la web Wisuki.

Figura 25

Datos de las olas de Cerro Azul



Nota. Información extraída de la web Tablademarea.

Tabla 5

Frecuencia de altura de olas en Cerro Azul

CERRO AZUL														Rango	Rango	
Color	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Periodo	Altura	
3+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	4.0	2	5.0	10	10	34.0	144	35.0	18.0	9.0	11.0	7.0	4.0	37.0	1.0	1.7
1-2	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
0-1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Total	28.0	28.0	31.0	36.0	31	39.0	113	51	26.0	28.0	28.0	26.0	31	2-22	0.8-1	

Nota. Adaptación de Web Wisuki y elaboración propia.

Tabla 6

Porcentaje de frecuencia de olas con respecto a su altura, Cerro Azul

CERRO AZUL														Porcentaje	Porcentaje
Color	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Periodo	Altura
3+	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2-3	14.00%	18.00%	32.00%	31.00%	35.00%	35.00%	33.00%	33.00%	33.00%	33.00%	33.00%	33.00%	33.00%	33.00%	33.00%
1-2	75.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%
0-1	7.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%	12.00%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Adaptación de Web Wisuki y elaboración propia.

Observando se determina que en enero el 78.69% de olas fueron de 1 a 1.3 metros de altura, mientras que en febrero es el mes más frecuente con el 83.4%. Mientras que en las alturas de 1.3 a 1.7m la mayor frecuencia de esas olas es en los meses de mayo, junio, julio y agosto, con el 45.48%, 48.16%, 44.37% y 44.87% respectivamente.

Tabla 7

Altura de olas en La Pampilla

LA PAMPILLA														Promedio	Promedio
Color	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Período	Altura
0.0-0.8	0.0-0.8	1.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.8-1.3	0.8-1.3	78.69%	83.4%	12.21%	46.25%	31.01%	61.74%	58.19%	47.20%	40.26%	31.67%	21.27%	21.27%	13	1.17
1.3-1.8	1.3-1.8	16.46%	16.8%	17.13%	20.00%	42.23%	31.64%	30.83%	39.20%	42.26%	41.73%	43.67%	48.16%	15	1.38
1.8-2.3	1.8-2.3	3.85%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.37
2.3-2.8	2.3-2.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.39
2.8-3.3	2.8-3.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.35
3.3-3.8	3.3-3.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.30
3.8-4.3	3.8-4.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.30
4.3-4.8	4.3-4.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.23
4.8-5.3	4.8-5.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.18
Total		29.2	24.8	30.6	29.2	31	28.8	31	31.1	29.3	30.8	29.8	31		

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8

Porcentaje de frecuencia de olas con respecto a su altura, La Pampilla

LA PAMPILLA														Promedio	Promedio
Color	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Período	Altura
0.0-0.8	0.0-0.8	4.78%	6.67%	12.21%	46.25%	31.01%	61.74%	58.19%	47.20%	40.26%	31.67%	21.27%	21.27%	13	1.17
0.8-1.3	0.8-1.3	16.46%	16.8%	17.13%	20.00%	42.23%	31.64%	30.83%	39.20%	42.26%	41.73%	43.67%	48.16%	15	1.38
1.3-1.8	1.3-1.8	3.85%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.37
1.8-2.3	1.8-2.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.39
2.3-2.8	2.3-2.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.35
2.8-3.3	2.8-3.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.30
3.3-3.8	3.3-3.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.30
3.8-4.3	3.8-4.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.23
4.3-4.8	4.3-4.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.18
Total		100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%		

Nota. Elaboración propia.

Se observa que las olas de altura 0.8 a 1 m son muy escasas, su mayor frecuencia de aparición se encuentra en el mes de marzo con un 0.33%, casi nada. Seguido las olas de 1 a 1.4 tienen mayor frecuencia en el mes de diciembre y enero, con el 45.48% y el 40.75% respectivamente.

Por otro lado la mayoría de olas están en un rango de 1.4 a 1.8m representando un 68.95% en el mes de febrero. Finalmente las olas de 1.8 a 2.3m tienen mayor frecuencia de aparición en el mes de junio con el 61.74%.

Tabla 9

Promedio de altura de ola en Cerro Azul por mes

CERRO AZUL														Promedio	Promedio
Color	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Período	Altura
0.0-0.8	0.0-0.8	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13	1.17
0.8-1.3	0.8-1.3	8.19	6.00	38.89	15.00	11.15	31.66	29.70	33.68	34.39	18.75	11.30	6.45	15	1.37
1.3-1.8	1.3-1.8	25.94	34.86	28.88	35.51	25.22	34.89	15.81	17.85	28.55	29.70	23.39	19.81	15	1.35
1.8-2.3	1.8-2.3	1.46	0.37	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	15	1.39
2.3-2.8	2.3-2.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15	1.30
2.8-3.3	2.8-3.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15	1.23
3.3-3.8	3.3-3.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15	1.18
Total		1.17	1.20	1.27	0.00	1.38	1.37	1.39	1.35	1.30	1.30	1.23	1.18		

Nota. Elaboración propia.

Tabla 10

Promedio de altura de ola en La Pampilla por mes

LA PAMPILLA														Promedio	Promedio
Color	Altura	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Período	Altura
0.0-0.8	0.0-0.8	1.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.8-1.3	0.8-1.3	78.69%	83.4%	12.21%	46.25%	31.01%	61.74%	58.19%	47.20%	40.26%	31.67%	21.27%	21.27%	13	1.17
1.3-1.8	1.3-1.8	16.46%	16.8%	17.13%	20.00%	42.23%	31.64%	30.83%	39.20%	42.26%	41.73%	43.67%	48.16%	15	1.38
1.8-2.3	1.8-2.3	3.85%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.37
2.3-2.8	2.3-2.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.39
2.8-3.3	2.8-3.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.35
3.3-3.8	3.3-3.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.30
3.8-4.3	3.8-4.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.30
4.3-4.8	4.3-4.8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.23
4.8-5.3	4.8-5.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15	1.18
Total		29.2	24.8	30.6	29.2	31	28.8	31	31.1	29.3	30.8	29.8	31		

Nota. Elaboración propia.

Luego de analizar las ecuaciones previamente mencionadas y basados en las zonas delimitadas por las playas de La Pampilla y Cerro Azul, teniendo en cuenta variables como altura significativa y periodo de las mismas, se usa la fórmula (9) para cuantificar el potencial en las costas del mar peruano. Como ejemplo se aplica el cálculo para el mes de enero:

$$P = 0.49027H_s^2T_e [kW/m] = 0.49027x1.17^2x13 = 8.79 kW/m$$

Se obtuvo un 8.79 kW/m de energía potencial en el mes de enero. De esta manera se obtiene la tabla 9 y 10 para las playas de Cerro Azul y La Pampilla respectivamente.

Tabla 11

Potencial energético de Cerro Azul

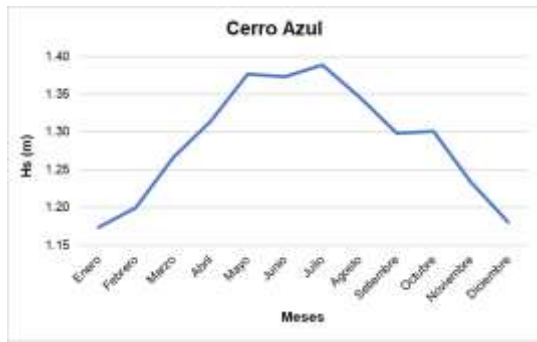
CERRO AZUL			
Meses	Periodo (s)	Hs (m)	Potencial (kW/m)
Enero	13	1.17	8.79
Febrero	13	1.20	9.18
Marzo	13	1.27	10.22
Abril	15	0.00	12.70
Mayo	15	1.38	13.94
Junio	15	1.37	13.86
Julio	15	1.39	14.18
Agosto	15	1.35	13.32
Setiembre	15	1.30	12.40
Octubre	15	1.30	12.44
Noviembre	13	1.23	9.70
Diciembre	13	1.18	8.88

Nota. Elaboración propia.

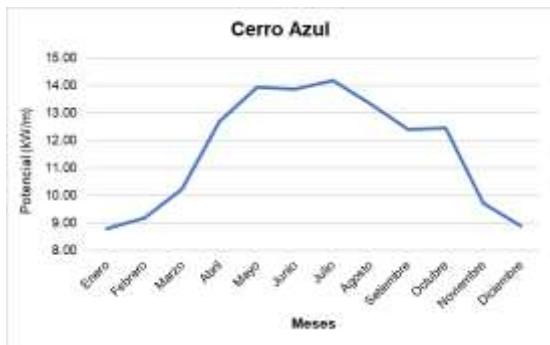
Para Cerro Azul en los meses de Mayo a Agosto se caracteriza por aprovechar más el potencial undimotriz, siendo Julio el mes con mayor frecuencia de olas altas que contienen más energía, se aprecia en la tabla 9 y figura 11, con altura de 1.39 m y potencial de 14.18 kW/m. El promedio de energía mensual sería de 11.64 kW/m para Cerro Azul lo que en 10 km de aprovechamiento de impacto sería 116.400 kW.

Figura 26

(a) Gráfica de Hs vs Meses (b) Potencia vs Meses para Cerro Azul



(a)



(b)

Nota. Elaboración propia.

En La Pampilla los meses de mayor frecuencia de olas con alturas significativas se encuentran entre Mayo y Agosto donde también el potencial undimotriz es alto, siendo en este caso Junio el mes con mayor frecuencia de olas altas, con altura de 1.85 m y potencial de 30.10. Tanto para Cerro Azul y La Pampilla entre los meses de Mayo y Agosto es donde hay una temporada de mayor olas con altura significativa. El promedio de energía mensual sería de 21.97 kW/m para La Pampilla lo que en 10 km de aprovechamiento de impacto sería 219.700 kW.

Tabla 12

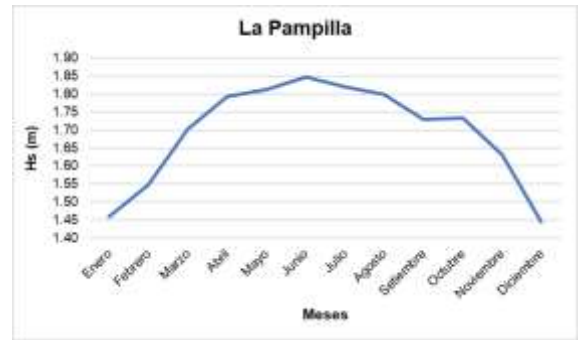
Potencial energético de La Pampilla

LA PAMPILLA			
Meses	Periodo (s)	Hs (m)	Potencial (kW/m)
Enero	14	1.46	14.80
Febrero	14	1.55	16.44
Marzo	14	1.70	19.90
Abril	14	1.79	22.07
Mayo	18	1.81	28.96
Junio	18	1.85	30.10
Julio	18	1.82	29.24
Agosto	18	1.80	28.56
Setiembre	14	1.73	20.54
Octubre	14	1.73	20.62
Noviembre	14	1.63	18.26
Diciembre	14	1.45	14.34

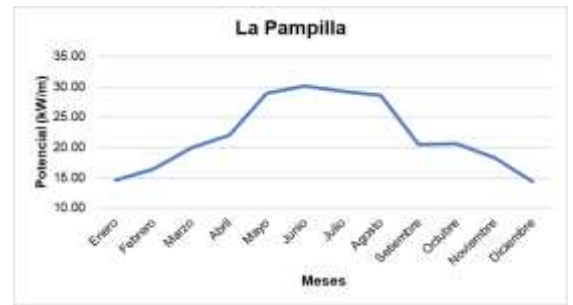
Nota. Elaboración Propia.

Figura 27

Gráfica de La Pampilla



(a)



(b)

Nota. Elaboración Propia.

Análisis probabilístico:

La distribución de Gumbel es una distribución diseñada para el estudio de valores máximos y mínimos de probabilidad muy útil para el estudio hidrológico (Sánchez, 2013). La función de distribución de Gumbel queda definida por la ecuación

$$F(x) = e^{-e^{-(x-u)/\alpha}}$$

donde $\alpha = S_x/\sigma_y$ y $u = \bar{X} - \mu_y\alpha$.

S_x : Desviación estándar de los datos

\bar{X} : Media de datos

$$\mu_y = 0.5772$$

$$\sigma_y = 1.2825$$

Cerro Azul:

Mediante el uso de la distribución de Gumbel, se ha calculado la probabilidad de obtener alturas significativas mayores a 1.2 m, 1.3 m y a 1.4 m. De la recopilación de datos, se verifica que con la altura crece el potencial energético, el cual alcanza valores destacables a partir de los 1.3 m.

Tabla 13

Análisis de distribución de Gumbel aplicado en la playa Cerro Azul

Distribución Gumbel	
X	1.288
S	0.077
alfa	0.1
beta	1.24
Probabilidad de obtener Hs mayores a 1.3 m:	Periodo de retorno (meses):
32.21	3.10
Probabilidad de obtener Hs mayores a 1.4 m:	Periodo de retorno (meses):
7.090	14.10
Probabilidad de obtener Hs mayores a 1.2 m:	Periodo de retorno (meses):
87.19	1.15

Nota. Elaboración propia

A partir de esto, se establece que existe casi un tercio de probabilidad de obtener a lo largo del año alturas superiores a 1.3 m, con un periodo de retorno de cada 3.10 meses.

La Pampilla:

Para este caso, el análisis se realizó para alturas de 1.6 m, 1.7 m y 1.8 m. De la recopilación, se ha podido comprobar que el potencial predomina a partir de los 1.7 m de altura aproximadamente.

Tabla 14

Análisis de distribución de Gumbel aplicado en la playa La Pampilla

Distribución Gumbel	
X	1.693
S	0.141
alfa	0.1
beta	1.61
Probabilidad de obtener Hs mayores a 1.7 m:	Periodo de retorno (meses):
36.16	2.77
Probabilidad de obtener Hs mayores a 1.6 m:	Periodo de retorno (meses):
67.142	1.49
Probabilidad de obtener Hs mayores a 1.8 m:	Periodo de retorno (meses):
16.35	6.04

Nota. Elaboración propia

A partir de esto, se establece que hay más de un tercio de probabilidad de obtener a lo largo del año alturas superiores a 1.7 m, con un periodo de retorno de cada 2.77 meses. Esto indica que La Pampilla no solo tiene olas más altas respecto a Cerro Azul, sino que las posee con mayor frecuencia y probabilidad, por lo que se puede inferir que existe un mayor potencial permanente aquí.

3.2.2. Diseño del sistema mecánico:

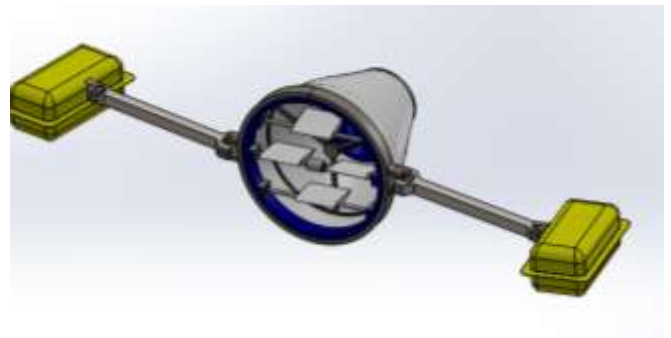
A. Descripción del sistema propuesto:

El diseño propuesto se basa en una tobera acoplada a dos elementos boyantes. La tobera en su entrada tiene instalados

varios perfiles, así como una variante de turbina tipo tornillo de Arquímedes en el fondo. El sistema se sostiene en flotación continua por la acción boyante de dos cápsulas flotadoras. Cada cápsula se conecta a la tobera por medio de un eslabón que se articula por medio de cardanes en sus extremos. Los cardanes dotan al sistema de la movilidad necesaria para posicionar la tobera, por medio de un sistema de control, en la posición propicia para aprovechar al máximo los perfiles de velocidad de las olas.

Figura 28

Vista general del sistema de aprovechamiento undimotriz propuesto



Nota. Elaboración propia

El funcionamiento tiene como principio la maximización de la energía cinética aprovechada de las olas. En primer lugar, los perfiles son capaces de adaptarse de tal manera que aprovechen las velocidades de agua. Las mediciones de velocidad se realizan a partir de la incorporación de sensores y son reportadas a un sistema de control que efectúa el accionamiento del giro de los perfiles. Con esto se garantiza perfiles de alta velocidad ingresando a la tobera.

Mientras tanto, la tobera tiene como principio de funcionamiento la reducción de su sección transversal para incrementar la velocidad del fluido que ingresa a través de ella. Con ambos efectos funcionando en conjunto, es posible sacar provecho a la energía cinética producida por el desplazamiento undimotriz.

B. Diseño del sistema mecánico en SolidWorks:

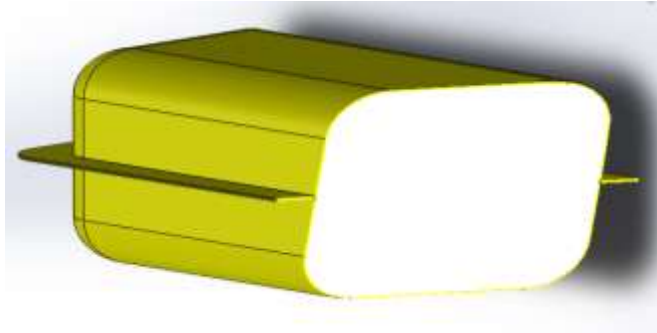
Flotadores:

Son cápsulas que van a permitir al sistema de generación permanecer en flotación en una posición cuasi fija, permitiendo el retorno indefectible a dicha posición ante cualquier embate del oleaje e impidiendo su hundición. Se constituyen de dos chapas de acero galvanizado en forma de tapa que al unirse

conforman la carcasa. Ambas chapas se unen por medio de un cordón de soldadura. En el interior se han rellenado de poliestireno, material típico usado en las boyas, para otorgarle la propiedad de flotabilidad.

Figura 29

Seccionado del flotador

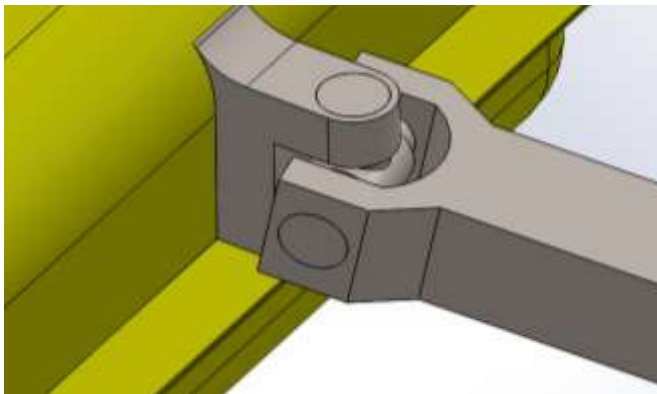


Nota. El interior es relleno con poliestireno, el cual está protegido por una carcasa de acero galvanizado. Elaboración propia.

Eslabones y cardanes:

Figura 30

Cardán que une al eslabón con el flotador

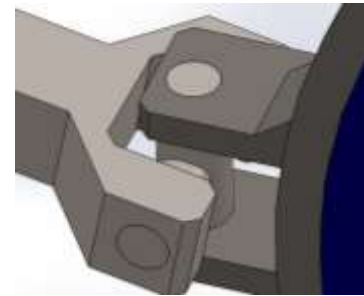


Nota. Permite un movimiento con dos grados de libertad. Elaboración propia.

El sistema se compone de dos eslabones que conectan la tobera con los elementos boyantes. La integración de cardanes proporciona la facultad de determinar y corregir la posición de la tobera favorablemente respecto a las componentes de velocidad de los oleajes. Al incorporar un sistema de control que recoge los valores sensados de los perfiles de velocidad y sus direcciones y pone en marcha el uso de actuadores eléctricos, sería posible conseguir el posicionamiento que aproveche al máximo la energía de las olas.

Figura 31

Cardán que une al eslabón con la tobera



Nota. El uso de cardanes permitirá el control posicional del sistema a favor del embate de las olas. Elaboración propia.

Sistema de perfiles alares:

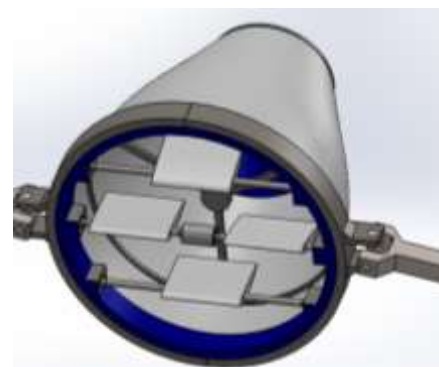
El sistema de perfiles alares replica el mismo funcionamiento, por medio del sistema de control, la información sensada y la operación de una serie de servomotores, redirige continuamente la orientación de los perfiles alares instalados en la parte frontal de la tobera. Los perfiles alares están dispuestos matricialmente, cubriendo la mayor sección de entrada de la tobera. La corrección de su orientación maximizará la velocidad de entrada del agua hacia la tobera, esto es, la energía cinética que recibe el tornillo. Cada perfil gira en torno a un eje acoplado a un anillo que recorre interiormente la tobera. A su vez, cada eje se acopla a un rodamiento para su libre revolución.

Tobera:

La tobera tiene como principio fundamental el postulado de Bernoulli en dinámica de fluidos: si se cuenta con una gran sección transversal, se incrementa la presión y consecuentemente se reduce la velocidad del fluido que circula a través de ella; si se reduce la sección, inmediatamente se decrecienta la presión y se favorece el aumento de la velocidad del fluido.

Figura 32

La tobera reduce su sección transversal,



Nota. Elaboración propia.

Tornillo de Arquímedes:

Por último, el tornillo es el elemento que transformará la energía cinética del fluido que circula por la tobera en energía cinética de rotación, apta para ser convertida en energía eléctrica por medio del acoplamiento de un alternador.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

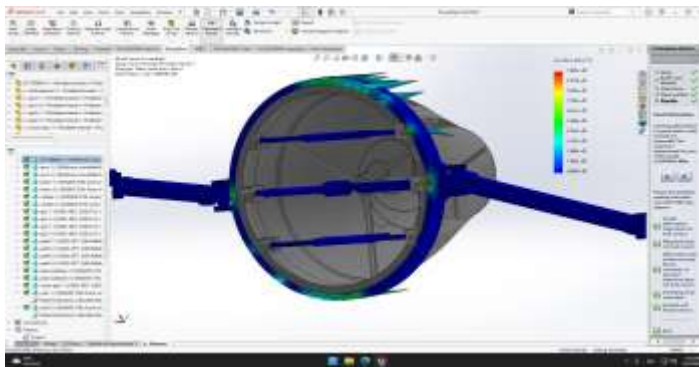
4.1. Aspectos técnicos:

4.1.1. Simulación de esfuerzos del sistema mecánico:

El sistema diseñado en SolidWorks se ha sometido a un análisis de esfuerzo usando la opción Simulation que ofrece el programa. Esto se ha realizado a fin de determinar la resistencia del dispositivo a los embates de las olas.

Figura 33

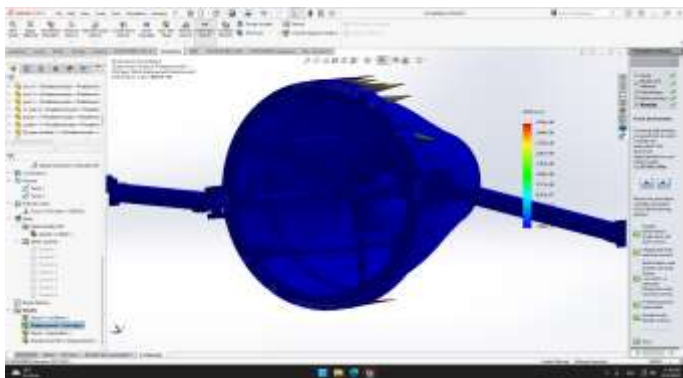
Simulación de esfuerzos sobre la parte frontal del sistema



Nota. Elaboración en SolidWorks Simulation

Figura 34

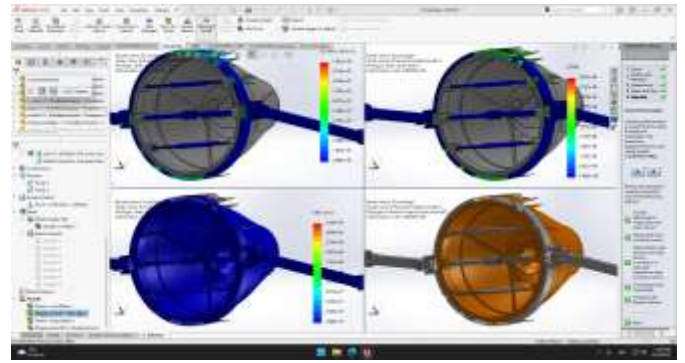
Simulación de esfuerzos sobre todas las piezas



Nota. Elaboración en SolidWorks Simulation.

Figura 35

Simulaciones de esfuerzos sobre el sistema mecánico



Nota. Elaboración en SolidWorks Simulation.

4.2. Aspectos económicos:

Presupuesto del proyecto:

Tabla 15

Presupuesto del proyecto

Materiales	Cantidad	Unidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
PLC Logo Siemens	1	Unidad	125	125
DAQ USB-6008-NI	1	Unidad	200	200
Sensor de SP6526	8	Unidad	25	200
Pittman 12VDC 8424G783 Servo Motor con Encoder	4	Unidad	39	156
SERVO MOTOR BALDOR DC MK-3363-CC8BE	2	Unidad	45	90
Actuador lineal electrohidráulico TG50-180 24VDC	2	Unidad	140	280
Bomba hidráulica OEM-71 24VDC	1	Unidad	250	250
Estructura metálica	1	Unidad	200	200
Generador de imán permanente sin engranajes de baja velocidad 2000W 220VAC	1	Unidad	400	400
Cablearía 12 AWG	100	Metros	40	40
Cablearía 14 AWG	100	Metros	40	40
				1981

Nota. Elaboración propia.

CONCLUSIONES:

- El litoral peruano ofrece un potencial energético undimotriz que puede ser aprovechado para generar energía eléctrica, solo se han estudiado 2 playas que fueron delimitadas por restricciones para futuras pruebas. A pesar de esto el potencial es satisfactorio, debido a la cantidad de energía que se puede aprovechar.
- La Pampilla es una playa que cuenta con potencial energético alto a comparación de Cerro Azul, ya que su potencial por mes promedio es de 21.97 a comparación de 11.64 . Además, este potencial es por solo una ola, lo que quiere decir que en 24h hay diferente cantidad de olas y la cual genera gran cantidad de energía que puede ser aprovechada para generar electricidad, recordando que los periodos están entre máximo 20 segundos por lo que 3 a 4 olas por minuto, siendo en 24h aproximadamente 94910.4 para La Pampilla y 50284.8 para Cerro Azul.
- Con el análisis Gumbel, se ha podido concluir que la regularidad de periodos de olas máximas es bastante óptima en ambos casos y que la presencia de considerables alturas significativas es relativamente probable a lo largo del año.

BIBLIOGRAFÍA:

1. COES (2022) Portal Indicadores BI - Datos Históricos. Lima, Perú. Recuperado el 7 de agosto del 2022 de: <https://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/VisorPowerBI>
2. Tamayo, Jesús; Salvador, Julio; Vásquez, Arturo y Carlo Vilches (Editores) (2016). La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país. Osinergmin. Lima, Perú.
3. Mendoza, J. (2012). Marco legal de las energías renovables en el Perú. Seminario de energías renovables en el Perú y tecnología made in Germany, 13 de noviembre, Osinergmin, Lima.
4. López M., Veigas M. e Iglesias G. (2015). On the wave energy resource of Peru. Energy Conversion and Management. España.

5. Castilla y León, J. (2022). El recorrido de la energía en Castilla y León. Jcyl.es, España. Recuperado el 7 de octubre de 2022, de <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/recorrido-energia-castilla-leon.html>
6. Cedec, T. (2022). Un paseo por la historia de la energía. Intef.es. Recuperado el 10 de agosto de 2022, de https://descargas.intef.es/cedec/proyectoedia/fisica_quimica/contenidos/investigando_energia/un_paseo_por_la_historia_de_la_energa.html
7. Dihironav (2021). NORMAS TÉCNICAS HIDROGRÁFICAS N° 08. Hidronav (2da edición). Lima, Perú. Recuperado el 5 de agosto de 2022, de <https://www.dhn.mil.pe/files/pdf/normas-tecnicas/NormasTecnicasHidrograficasN%C2%B008.pdf>
8. Wisuki (2022). Que es Wisuki. Agencia Interactiva Cool Z. Recuperado el 10 de agosto de 2022, de <https://es.wisuki.com/about>
9. TabladeMareas (2022). Tabla de mareas y solunares. Recuperado el 10 de agosto de 2022, de <https://tablademareas.com/pe/lima/cerro-azul>.
10. Muñoz, J. (2017). *Ondas regulares y su aplicación a la ingeniería de costas*. Cádiz, ES: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 2011.
11. Duckers, L. (1992). Renewable Energy. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041268-9.50008-0>
12. Ocean Energy Systems (2021). *WAVE ENERGY DEVELOPMENTS HIGHLIGHTS*. Formas do Possivel.
13. Universidad Tecnológica Nacional Buenos Aires- Facultad de Ingeniería mecánica (2021). *Lo más destacado en energía undimotriz*. <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/lo-mas-destacado-de-la-energia-undimotriz/>
14. Stock-williams, C., & Gunn, K. (2016). Quantifying the global wave power resource. Renewable Energy, (November). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>
15. Mocean Energy. (22 de septiembre de 2021). *Mocean's Blue X Experience*. [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=9Y6Uace5EPI>.
16. Liquid. (14 de mayo de 2019). *OceanEnergy OE35*. [Archivo de Vídeo]. Vimeo.

https://vimeo.com/336091410?embedded=true&source=video_title&owner=90003024

17. Fernández, J. (2008). *Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad*. [Proyecto de fin de carrera]. Universidad Politécnica de Madrid.
18. Gutiérrez, J. (2016). *Aprovechamiento de la energía de las olas. Energía undimotriz*. [Trabajo de fin de grado]. Universidad de La Laguna.
19. Desarrollan una nueva turbina capaz de extraer el doble de energía de las olas. (23 de agosto de 2021). *Renewable Energy Magazine*. https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/desarrollan-una-nueva-turbina-capaz-de-extraer-20210823
20. Pursell, S. (16 de agosto de 2021). ¿Qué es el benchmarking y qué tipos existen? (incluye ejemplos). *HubSpot*. Actualizado el 26 de agosto de 2022. <https://blog.hubspot.es/marketing/benchmarking>
21. Energyocean. (11 de marzo de 2009). *OE Bouy operating principle*. [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=T20dCGPjxPQ>.
22. Garanovic, A. (5 de octubre de 2022). *Subsea cable in place for HiWave-5 wave energy connection*. Offshore Energy. <https://www.offshore-energy.biz/subsea-cable-in-place-for-hiwave-5-wave-energy-connection/>
23. Reyes, J. (2020). *Análisis de operación de un sistema de generación undimotriz conectado a un modelo de red*. [Trabajo de fin de grado]. Universidad de La Salle.
24. Ye, Y., Wang, K., You, Y., Sheng, S. (2019). Research of Power Take-off System for “Sharp Eagle II” Wave Energy Converter. <https://doi.org/10.1007/s13344-019-0060-2>.
25. Garanovic, A. (20 de octubre de 2016). *Blue X wave energy converter shaping up for Orkney splash*. Offshore Energy. <https://www.offshore-energy.biz/blue-x-wave-energy-converter-shaping-up-for-orkney-splash/>
26. Carnegie Clean Energy. (23 de septiembre de 2020). *OE Bouy operating principleCarnegie Wave Predictor - Sea the Future*. [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=OUX1yfcEX58>.
27. McCormick, M., & Ertekin, C. (2008). Renewable Power. *Renewable Energy*. (June).