

Prototype of a Wave Power Energy Generator in Honduras

Ángel Raúl Matute Madrid¹, Mechatronic Engineer, Virgilio Alberto Moncada Valenzuela², Mechatronic Engineer,
Alicia María Reyes Duke³, Master degree

^{1,2,3} Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras
angelraul8@unitec.edu, virgiliomoncada@unitec.edu, alicia.reyes@unitec.edu.hn

Abstract – Renewable energy is a clean way to meet the needs of mankind without polluting the environment, using natural resources. Wave energy is based on capturing the continuous ripples in the sea. The present investigation developed a prototype of a low-cost and efficient wave generator, capable of generating electrical energy, generating a maximum power of 1,125 Watt. The wave generator is buoy type, but with a wave oscillating mechanism. For the elaboration of the project, the necessity of using different books, thesis, articles and design programs was chosen to cover the ideal characteristics of the generator. The present project is a technological development project with a quantitative and qualitative approach and a V-type study methodology.

Keywords— Linear generator, oscillation, power, wave, wave energy.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.614>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Prototipo de un Generador de Energía Undimotriz en Honduras

Ángel Raúl Matute Madrid¹, Ingeniero en Mecatrónica, Virgilio Alberto Moncada Valenzuela², Ingeniero en Mecatrónica, Alicia María Reyes Duke³, Máster en ingeniería

^{1,2,3} Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras
angelrau18@unitec.edu, virgiliomoncada@unitec.edu, alicia.reyes@unitec.edu.hn

II. CONTEXTO

Resumen Ejecutivo – La energía renovable es una manera limpia de poder cubrir las exigencias que la humanidad necesita sin contaminar el medio ambiente, utilizando recursos naturales. La energía undimotriz se basa en la captura de las ondulaciones continuas en el mar. La presente investigación se desarrolló un prototipo de generador undimotriz de bajo costo y eficiente, capaz de generar energía eléctrica, generando una potencia máxima de 1.125 Watt. El generador undimotriz es tipo boya, pero con un mecanismo oscilante del oleaje. Para la elaboración del proyecto se optó la necesidad del uso de distintos libros, tesis, artículos y programas de diseño para cubrir con las características ideales del generador. El presente proyecto es de desarrollo tecnológico de enfoque cuantitativo y cualitativo con una metodología de estudio tipo V.

Palabras clave—Energía undimotriz, generador lineal, oleaje, oscilación, potencia.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de nuevas tecnologías alternativas para generar energía eléctrica ha incrementado en los últimos años. La energía renovable es una manera de poder cubrir las exigencias energéticas, utilizando recursos naturales. El cambio climático nos lleva a realizar estudios en el mar; muchos de estos estudios son importantes para conservar nuestros océanos y costas. [1]

Las olas son ondulaciones continuas de agua sobre la superficie del mar producidas por el viento. La energía undimotriz se basa en capturar este recurso natural, por medio de las ondulaciones continuas, generando energía de forma limpia. Este tipo de energía renovable todavía está en estudio y ha sido aplicado mayormente en el continente europeo.

Implementar este tipo de energía generaría un gran impacto en las zonas costeras del mundo, ya que si tomamos en cuenta las ondulaciones de las olas son inagotables y generan movimientos periódicos que sirven para generar electricidad de una forma segura e interminable sin contribuir ningún tipo de daño al ambiente. El agua es un vector energético increíble por la capacidad que tiene de acumular y transportar energía por largas distancias y con pérdida mínima de esta misma. Las costas presentan un gran potencial energético que no se está aprovechando.

La finalidad de la investigación tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo de un generador de energía undimotriz de bajo costo y cerca de la costa para determinar su función, haciendo uso de herramientas de software de diseño, distintos análisis matemáticos y componentes físicos.

La energía undimotriz es un tipo de energía renovable en constante estudio y se encuentra en fase experimental.

Desde el siglo XVIII, se han realizado varias patentes para la energía undimotriz como se muestra en la Fig. 1. La primera patente fue del ingeniero francés Pierre-Simon Girard.

Esta consistía en una palanca con un extremo conectado a la orilla y el otro conectado a un flotador que descansa sobre el mar, así transfiriendo los movimientos del flotador en energía. [2]

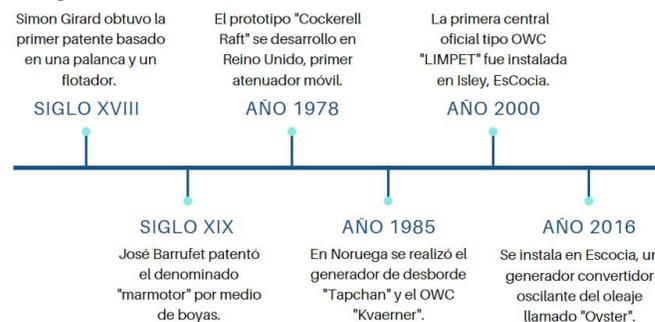


Fig. 1 Línea de tiempo de los generadores undimotrices

En el siglo XIX, José Barrufet, patentó el denominado "marmotor" en España. El aparato Barrufet consistía en una serie de boyas que oscilaban con las olas, accionando el generador eléctrico. [3]

En 1978, se experimentó en el Reino Unido un prototipo de la tecnología del convertidor de ondas de atenuador móvil. Este prototipo se llamaba *Cockerell Raft*. Obtuvo una potencia de 1 kW. [4]

En 1985 en Noruega, se construyeron dos generadores undimotrices: *Tapchan* que era un dispositivo de desborde con una potencia de 350kW y el *Kvaerner*, que era un sistema de columna de agua oscilante cuya potencia era de 500 KW. [4]

LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter) fue un dispositivo de columna de agua oscilante o *OWC* por sus siglas en inglés, con una potencia de 500kW, ubicada en las islas de Isley, Escocia, que estuvo operando desde el 2000 hasta el 2012. [5]

El *Oyster* es un generador convertidor oscilante del oleaje, ubicada en Orkney, Escocia. Este tiene una potencia total de 350 KW. [6]

Actualmente, existen varias propuestas undimotrices siendo prototipadas y experimentadas a lo largo del mundo, algunas siendo un éxito y otras considerada fracaso.

La energía capaz de ser aprovechada utilizando las olas es mejor que las otras alternativas limpias de mayor uso como se muestra en la Tabla 1, donde se compara la potencia por unidad de superficie de la energía undimotriz con los tipos de energía renovable más utilizados. [7]

TABLA 1
CUADRO COMPARATIVO DE LAS POTENCIAS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES MÁS UTILIZADAS

Fuente Energética	Potencia Por Cada Unidad De Superficie
Biomasa	1.5 W/m ² (varia por método)
Eólica	135.86 W/m ²
Solar	100 a 400 W/m ²
Undimotriz	1662 W/m ²

Como se muestra en la tabla 1, la energía undimotriz es 5 veces más concentrada que la energía eólica y 30 veces más que la solar [8]. Por esta razón la energía undimotriz es conveniente al igual que la eólica, ya que la densidad del agua es 835 veces mayor a la del aire, por lo tanto, se puede obtener la misma energía utilizando menores equipos. [9]

Varios países están apoyando el desarrollo de diversas instalaciones a lo largo de las costas. En la actualidad, existen varios tipos de generadores undimotriz en el mundo, con mucha más eficiencia y capacidad de energía.

En la Fig. 2, se puede ver la distribución de los generadores undimotriz clasificados por la EMEC (European Marine Energy Centre) [10].

Este proyecto de investigación se encuentra en la categorización del 27% de dispositivos desarrollados sin ser clasificados por ser un prototipo diferente.

USO DE GENERADORES UNDIMOTRIZ

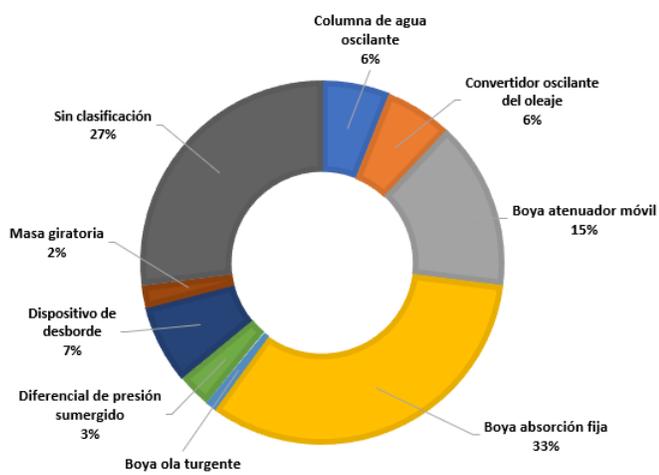


Fig. 2 Distribución de los desarrolladores de energía undimotriz

La capacidad de extraer la energía disponible depende de la eficiencia y el tipo de dispositivo instalado. En la Fig. 3, se muestra el potencial energético undimotriz en todo el mundo.

Se puede apreciar que las costas europeas del lado oeste son las que pueden aprovechar más el potencial undimotriz.

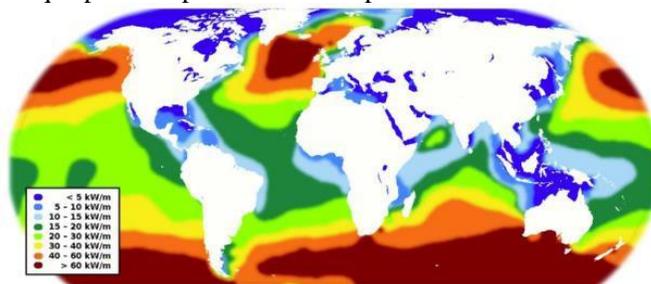


Fig. 3 Estimación global de los niveles de energía undimotriz [11]

III. METODOLOGÍA

Para este proyecto se eligió la metodología en “V” debido a su enfoque que satisface los requisitos adecuados para la ejecución del proyecto, ya que permite verificar que se están cumpliendo y, de no ser así, realizar cambios en el diseño para que todos los sistemas puedan implementarse [12].

En la Fig. 4, se muestran las etapas de la metodología de estudio del proyecto.

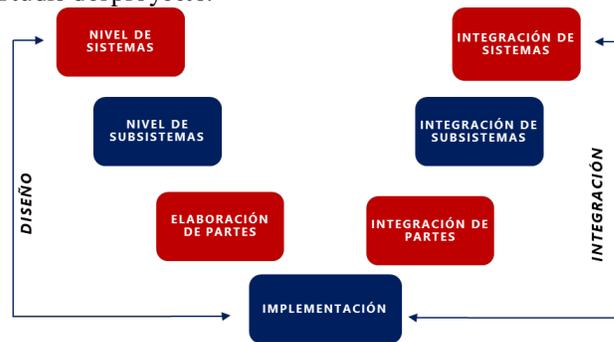


Fig. 4 Metodología en “V”

El proyecto es una boya marina capaz de generar electricidad. Se requiere que el prototipo produzca 1 Watt de potencia, que sea de bajo costo y con una elaboración simple para su implementación en lugares remotos. En la Fig. 5, se muestra la división de los 2 sistemas separados para la elaboración del proyecto y después se procedió a la integración de ellos en un mismo sistema.

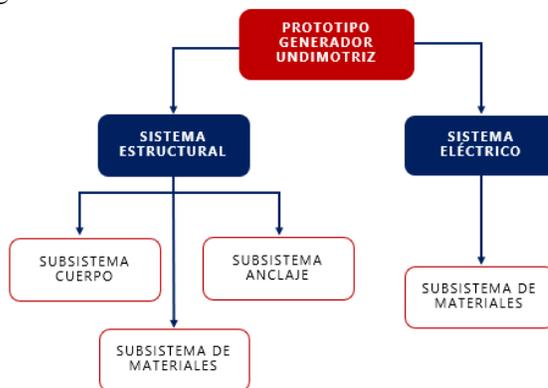


Fig. 5 División de sistemas y subsistemas

A. Sistema Estructural

Después de tomar en cuenta varios diseños y realizando una investigación de varios métodos usados previamente se escogió un diseño que cumpliera con las necesidades del proyecto.

Para el diseño de la estructura del prototipo se basó principalmente del tipo de boya absorción fija, al cual se realizaron unos cambios internos y externos.

La boya de absorción fija es una estructura flotante que absorbe energía de las direcciones a través de sus movimientos en la superficie del agua.

La boya es movida por las olas del mar y está anclada y sujeta entremedio por un generador lineal que genera la electricidad inducida como se muestra en la Fig. 6.

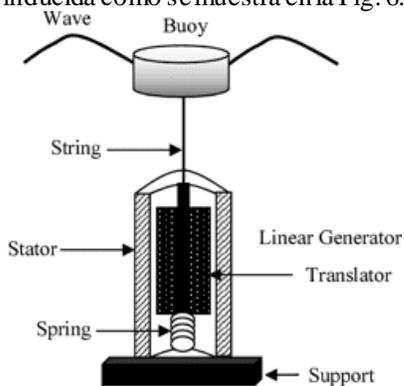


Fig. 6 Mecanismo de una boya fija [13]

El principio del prototipo es diseñar un generador diferente a los existentes, por lo tanto, se tomó lo que es el sistema de boya y el anclaje, pero el sistema eléctrico se introdujo dentro del cuerpo del dispositivo, siendo así un generador interno unidimotriz, denominado “boya osciladora”.

Para el subsistema cuerpo, se realizó una investigación de los posibles diseños que ofrecieran la mejor estructura para albergar los generadores y proveer el movimiento rotacional al entrar en contacto con las olas. Se decidió utilizar un diseño de tipo cilíndrico. De esta manera la boya tendría un movimiento oscilante constante al ser golpeada por el oleaje. Este tendrá un contra peso en la parte inferior y amarres para la colocación de las anclas.

Para darle soporte a los generadores se diseñó y construyó una estructura para sostener los generadores en su lugar dentro de la boya. Consta de una barra central que se sujeta a los lados de la boya y una plataforma atornillada en medio que sostiene a los generadores y los mantiene en la parte superior de la boya donde se verá el mayor movimiento.



Fig. 7 Construcción de la estructura interna

Se realizaron pruebas para determinar el tipo de anclaje. Se identificó que se necesitarían dos puntos de anclaje de forma longitudinal para mantener a la boya en la posición preferida donde esta reciba el impacto del oleaje en su lado y no enfrente o atrás. Las cadenas de este anclaje tienen que ser flexibles pero fuertes, que resistan tensiones altas y la corrosión.

En materiales se requirió de la utilización de un medio de flotación a prueba de agua capaz de resistir un oleaje cercano a la playa y con resistencia a la corrosión, como el polietileno de alta densidad o el PVC. Lo mismo con el anclaje, como el acero inoxidable o hierro galvanizado.



Fig. 8 Amarre exterior de la boya

Para la boya se utilizó un barril hecho de polietileno de alta densidad o *HDPE* por sus siglas en inglés. Este material fue elegido por su accesibilidad en el país y su resistencia a la corrosión, a los estreses de presión y a impactos, lo cual es de gran importancia pues la boya va a estar bajo constantes fuerzas al ser impactada por el oleaje. Además, presenta una buena resistencia contra degradaciones por microorganismos o ataques biológicos de los que pueda ser víctima por macroorganismos.

El barril tiene 62cm de longitud y 37cm de diámetro, con un grosor de 5mm.

Para la sujeción del anclaje se utilizó una serie de amarres con cabuyas de 1cm de grosor pues no se quería dañar la capacidad de flotación de la boya.

Para el anclaje se decidió utilizar cadenas de hierro galvanizado con una resistencia de 215kg. Cada eslabón tiene 3.5mm de espesor y es 3.5cm de largo por 1.4cm de ancho.

Son dos cadenas de un metro de largo cada una y que esa es la mejor profundidad para el funcionamiento del prototipo. El peso del anclaje son dos pesas de cemento de 25lb cada uno

B. Sistema Eléctrico

El diseño más conveniente para el sistema eléctrico es el de los generadores lineales, ya que este convierte el movimiento oscilante de la boya en una forma de generar energía eléctrica. Un dispositivo que usa un generador lineal es conocido como dispositivo de accionamiento directo, ya que el movimiento del dispositivo se utiliza para impulsar directamente un generador, es decir, no se requieren componentes auxiliares como turbinas, hidráulicos, etc.

En los dispositivos de energía de las olas, los generadores lineales normalmente funcionan con fuerzas máximas elevadas y baja velocidad. El generador lineal se puede configurar de varias maneras, incluidas las que se muestran en la Fig. 9.

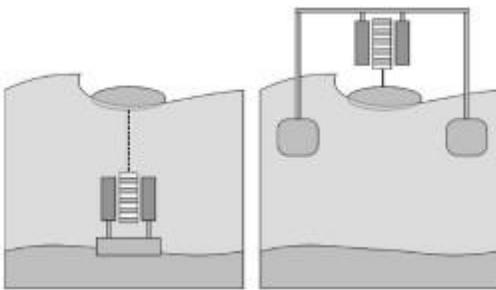


Fig. 9 Configuraciones de un generador lineal [14]

Se esperó que los generadores requeridos fueran de 5 generadores conectados de manera en serie para la generación de una potencia mínima de 1 Watt.

Para la construcción de los 5 generadores lineales se utilizaron tubos de policloruro de vinilo o PVC por sus siglas en inglés, con alto rango de tamaño y no reacciona con elementos magnéticos. Para este fin se utilizó tubería de 3/4 de pulgada de PVC con 12 pulgadas de longitud. Dentro de las tuberías corren imanes de neodimio de alta fuerza.

Estos imanes proveen una alta fuerza magnética y son de pequeña envergadura, por lo cual son perfectos para el desarrollo de este proyecto. En la parte central de ellos se embobina con el cable de cobre de 0.5mm, con 80 vueltas sobre el cuerpo repetidas 11 veces. Una vez se terminó de embobinar los imanes fueron introducidos para la realización de pruebas en el laboratorio. En la Fig. 10, se muestra la realización de uno de los generadores lineales.



Fig. 10 Elaboración de los generadores lineales

Se integraron los 5 generadores lineales con los respectivos imanes de neodimio, un total de 35 imanes de neodimio con dimensiones de 18x5mm que correrán libremente por los tubos y el embobinado será de cobre recubierto de 0.5mm de espesor. Este cable al estar embobinado alrededor de la tubería PVC reaccionará con los imanes pasando a través de tubo a su vez generando energía eléctrica. Al final de cada tubo se colocan tapones de PVC con algodón adentro para detener los imanes y evitar rajaduras o quebraduras cuando estos impacten con los tapones. En la Fig. 11, se ven los imanes de neodimio.



Fig. 11 Imanes de neodimio de 18x5mm

Para transportar la energía de la boya hacia un muelle se utilizó un cable de 4mm de grosor de 68cm de largo. Este cable está conectado directamente con los generadores. Se utilizará una luz led para las pruebas de campo, para verificar que el sistema funciona.

Para la luz led se diseña una caja en CAD y se instala los cables y la luz para proteger su integridad. Los archivos CAD/CAM se utilizan para diseñar piezas para diferentes aplicaciones; SolidWorks Simulation proporciona información sobre estrés, desplazamiento, factor de seguridad. [15]

IV. DESARROLLO Y RESULTADOS

A. Etapa 1: Nivel de sistemas

El proyecto se ideó inicialmente para que sea una boya capaz de generar energía eléctrica usando el movimiento oscilante de las olas. Los parámetros para su funcionamiento son los generadores lineales con imanes de movimiento libre dentro de ellos. Al inclinarse de un lado los imanes caen por los generadores, a través del embobinado de cobre y esto causa una generación de energía.

Como se mencionó anteriormente, los generadores funcionarán dentro de una boya por lo cual este prototipo debe ser protegido por un material capaz de brindar flotabilidad, dureza y resistencia a las temperaturas del mar. Aquí abarcan los que son el sistema estructural y el sistema eléctrico.

B. Etapa 2: Nivel de subsistemas

Se analizaron lo que son el nivel de subsistemas cuerpo, subsistema de anclaje y el subsistema de materiales, tanto el estructural como el eléctrico. Una vez finalizado el análisis se procedió a realizar la renderización del prototipo de la boya.

Se requirió de un diseño cilíndrico para la estructura que proporcione un movimiento oscilante al ser golpeado por las olas. Se empezaron a realizar diseños en *SolidWorks* para tener una mejor idea de lo que se estaría buscando. Se diseñó con la idea de que este tendría dos puntos de sujeción para el anclaje, un contrapeso para que esta realice el movimiento ondulatorio repetidamente y una plataforma para mantener a los generadores en su posición. En la Fig. 12, se presenta una renderización del prototipo de la boya.



Fig. 12 Estructura interna del cuerpo de la boya

En esta vista se presenta el contra peso dentro de la boya y la estructura para mantener a los generadores en su lugar. La forma cilíndrica de la boya generará un movimiento oscilante cuando sea golpeada por una ola en su lado lateral. Este movimiento será corregido por el contrapeso haciéndolo repetirse indefinidamente mientras están en el mar.

Una vez se tuvo el barril y los demás materiales se decidió hacer estudios de flujo en el prototipo actualizado. Para dichos estudios se utilizó *SolidWorks Flow Simulation*. Los estudios se realizaron de forma correspondiente al funcionamiento de la boya. Por eso su base estará 20cm sumergida y el resto está expuesto al aire.

A continuación, se muestra un resumen del análisis completo con los valores correspondientes al igual que las gráficas de ellos. Al realizar esto, las fuerzas de presiones o esfuerzo son un peligro para la integridad estructural de la boya y se utilizarán esos valores para simular presiones similares o mayores en el diseño para determinar si este es susceptible a fallas.

En la Tabla 2 se observa el resumen de los resultados con sus totales que se logró obtener del análisis estructural de la

boya. Se tomó en cuenta la exposición a ambos fluidos, el agua y el aire, al realizar el análisis.

TABLA 2
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA BOYA OSCILANTE EN
SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

Nombre De La Meta	Unidad	Valor	Valor Promedio
Presión estática promedio	[Pa]	101,326.3	101,324.88
Presión Total Promedio	[Pa]	101,362.4	101,355.52
Velocidad media (eje Z)	[m/s]	0.493	0.413
Intensidad de turbulencia media	[%]	3.36	3.21
Fuerza (eje Z)	[N]	1.062	0.122
Es fuerza cortante promedio (eje Z)	[Pa]	0.00261	0.00308

Como se puede apreciar en la tabla, las presiones estáticas y totales están muy por debajo de lo que se puede considerar un peligro para la integridad de la boya. Este resultado era esperado pues la boya estará flotando sobre el agua y por ende la presión a la que será sometida será muy baja.

También se observa en el análisis que muestra la fuerza en el eje Z con un valor máximo de 1.062N y un valor promedio de 0.122N. La razón por la cual tiene un valor máximo tan elevado es porque el agua está golpeando la cara lateral de la boya que tiene una gran superficie mayormente plana. Por esta razón el agua ejerce una mayor fuerza, sin embargo, es necesario que ejerza esta fuerza para causar el movimiento que se necesita para la generación de energía y sigue estando dentro de los límites de resistencia de la boya.

En la Fig. 13, se muestra el estudio realizado por medio de *SolidWorks Flow Simulation* que muestra la presión a la cual la boya estará sometida.

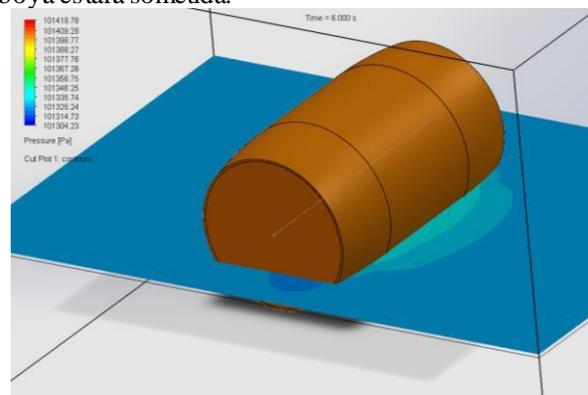


Fig. 13 Análisis de presión total

Se observa que la mayor presión estará ubicada en la cara lateral donde será el impacto con la ola. Esta presión máxima es de 101,366Pa. Un valor muy bajo y lejos de la tolerancia máxima de presión que tiene el barril, por ende, se sabe que la boya se encontrará en una posición segura en el océano.

Las fuerzas ejercidas sobre el *HDPE* son demasiado bajas como para causarle daño. Cabe mencionar que el material es

bastante efectivo resistiendo fuerzas mucho mayores. En la Fig. 14, se observa el gráfico de estrés cortante en la boya.

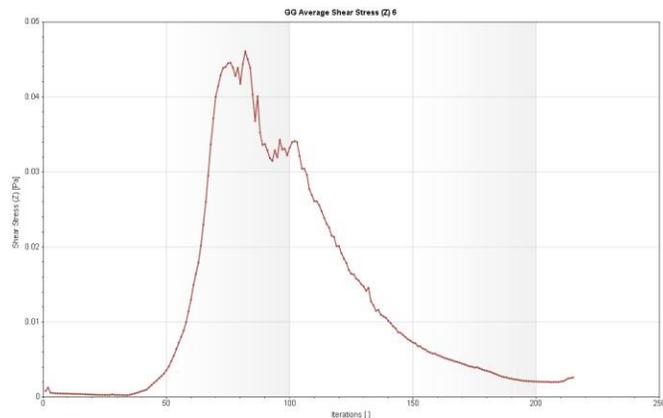


Fig. 14 Gráfico de esfuerzo aplicado sobre la boya

El valor máximo ejercido fue de 0.046Pa, por lo cual, aproximadamente 0.046 Newtons fueron ejercidos sobre cada metro cuadrado de la boya. Este análisis es bastante ventajoso para saber que tanto se está esforzando la boya en resistir el oleaje que la golpea. En este caso el esfuerzo que el agua está ejerciendo sobre la boya es prácticamente nulo.

En la Fig. 15, se puede ver el rango de los estreses posibles que tenga que resistir la boya donde se obtiene como estrés mínimo 2.946 N/m² y máximo 4x10⁰⁵ N/m². En la simulación se ejerció la fuerza de impacto de una ola de 0.7 metros de altura. Se aplicó la fuerza en las caras de la boya a pesar de que estas no deberían de recibir un impacto directo.

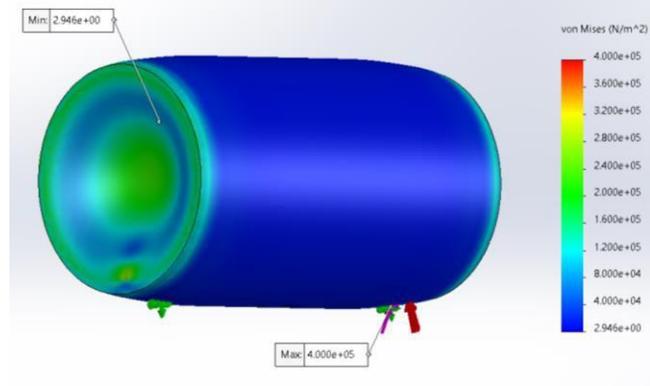


Fig. 15 Estreses posibles actuando sobre la boya

Los rangos de desplazamiento son de 3.627x10⁻¹ mm en su punto máximo de las caras y uno mínimo de 1x10⁻³⁰ mm en los soportes de anclaje como se muestra en la Fig. 16. Este demuestra la resistencia del material a las fuerzas a las cuales será expuesto.

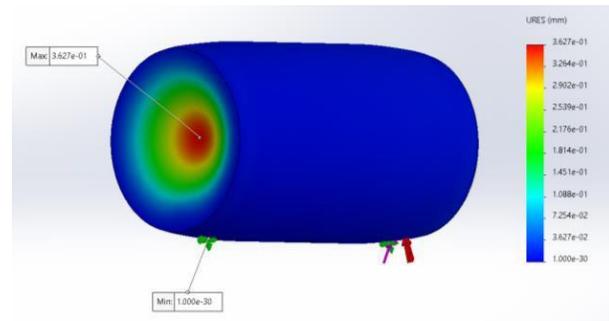


Fig. 16 Desplazamientos causados por presión en la boya

C. Etapa 3: Elaboración de las partes

C.1 ELABORACIÓN DE LA PARTE ESTRUCTURAL

Se instaló un contrapeso de madera en la parte inferior de forma longitudinal a la boya para mantenerla en la posición correcta y que esta realice el movimiento esperado.

Se le hicieron agujeros en la parte superior para la instalación del cableado eléctrico y para sujetar los generadores lineales en la parte superior de la boya.

C.2 ELABORACIÓN DE LA PARTE ELÉCTRICA

Se construyeron los 5 generadores lineales utilizando cobre de 0.5mm de espesor, con un embobinado alrededor de un tubo 3/4' de PVC con ochenta revoluciones repetidas 11 veces. Dentro de los tubos se colocaron 35 imanes, 7 en cada uno.

Para empezar las pruebas con los generadores se cerraron los tubos PVC con los imanes dentro, y se hicieron pruebas en el laboratorio de electrónica para medir su voltaje y amperaje pico. Se realizaron varias pruebas para determinar si el número de vueltas en el embobinado sería el correcto. Se midieron voltaje de los generadores de forma individual y conectados en serie. Se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 3.

TABLA 3

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE ELECTRICIDAD

Conexión	Voltaje Pico-Pico	Corriente	Potencia Instantánea
Individual	5.8V	20mA	0.116W
En Serie	30V	91.4mA	2.74 W

D. Etapa 4: Integración de las partes

Esta etapa consta de la integración de las partes que se realizaron de forma física explicadas en la metodología.

E. Etapa 5: Integración de subsistemas

E.1 SUBSISTEMA DE MATERIALES: ESTRUCTURAL

Se realizó una prueba campo con la estructura de la boya para revisar la flotabilidad y las posibles filtraciones de agua en el cuerpo. La prueba se realizó en el área de Omoa en el Departamento de Cortés, Honduras para revisar la

funcionalidad del proyecto, posibles filtraciones de agua y la funcionalidad del contrapeso.



Fig. 17 Prueba de campo 1

Las pruebas de flotabilidad fueron un éxito, no hubo filtraciones en la boya y el contra peso funcionó como era esperado, con la boya generando un movimiento oscilatorio al ser investida por el oleaje. Se revisó por dentro posteriormente y no hubo residuos de agua dentro de la boya por lo cual se determinó que el sellado funcionó y la boya es capaz de resistir el mar y la corrosión.

E.2 SUBSISTEMA DE MATERIALES: ELÉCTRICO

Los 5 tubos PVC se pusieron en serie y se ensamblaron en un panel para una mayor facilidad al momento de ser colocados dentro de la boya. Este va conectado con el cable de corriente que transportara la electricidad.



Fig. 18 Generadores lineales en serie

Se le fabricó una caja para que sostuviera el indicador led de los generadores. Se diseñó en *Solidworks* y se imprimió para que resguardara las conexiones de la boya hacia el indicador led.

F. Etapa 6: Integración de sistemas

Con las pruebas de los subsistemas completados, el paso final es la unión de estos y los sistemas para la revisión de su funcionamiento total. Se colocaron los generadores en la estructura diseñada para sostenerlos y esta misma se colocó en el lugar correspondiente dentro de la boya. En la Fig. 19, se

observa como la estructura y ésta a su vez ayuda a mantener el contra peso en su lugar.



Fig. 19 Estructura interna completa de la boya

Se realizaron las últimas pruebas de campo en el mar, se comprobó que los generadores se mantuvieran en su lugar sostenidos por la estructura realizada dentro de la boya. El peso final de la boya es de 16.8 lb.



Fig. 20 Generador undimotriz en el muelle de Cieneguita, Cortes.

El anclaje mantuvo la boya en la posición deseada donde las olas que la impactaban causaron un movimiento oscilante. La boya se encontró a 67 ft de la costa y a 2.5 ft de profundidad. Una vez terminadas las pruebas se revisó nuevamente dentro de la boya para confirmar que no hubo filtraciones y los generadores fueron protegidos del oleaje.

El valor en el cuerpo, anclaje y estructura interna se estimó como un total de \$ 107.00 aproximadamente y el sistema eléctrico con un valor total estimado de \$ 157.00. En la Tabla 4, se muestra el costo total.

TABLA 4
TABLA DE COSTOS FINALES DEL PROTOTIPO

Estructura de la boya	Sistema eléctrico	Total
\$ 107.00	\$ 157.00	\$ 264.00

Una variable fue la distancia de la costa y la profundidad en la cual la boya estaría ubicada. Para esto se realizaron pruebas de campo donde se midieron las distancias y profundidades en las cuales la boya produciría mayor potencia sin poner en riesgo la integridad de la boya. En la Tabla 5, se muestra las distancias, profundidades y potencia en las pruebas de campo.

TABLA 5
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

Distancia	Profundidad	Voltaje	Corriente	Potencia
30 ft	1.8 ft	19.2 V	0.077 A	1.48 W
67 ft	2.5 ft	14 V	0.075 A	1.05 W
100 ft	3 ft	11.3 V	0.054 A	0.61 W

A distancia de 30 ft de la costa con una profundidad de 1.8 ft, hay una producción de energía constante sin embargo el oleaje presenta dificultad ya que su alta velocidad y cantidad ponen en riesgo la integridad interna de la boya, ya que el oleaje tiene mayor velocidad y la ola en si será de mayor altura. A la vez, el suelo marino a tal distancia de la costa no es lo suficientemente estable para un anclaje sólido.

A distancia de 67 ft de la costa con 2.5 ft de profundidad el oleaje es más disperso y las oscilaciones son menos violentas. Hay buena generación de energía con oscilaciones frecuentes.

La distancia de 100 ft dentro del mar con 3 ft de profundidad. El oleaje causaba menos oscilaciones. Era más estable pero no producía la frecuencia deseada.

Debido a estos resultados se decidió que la mejor distancia y profundidad para anclar el prototipo es a 67 ft de la costa a 2.5 ft de profundidad.

V. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se obtuvo un total de 2.74 Watts de potencia en los generadores dentro de la boya. Se realizó una estructura oscilante capaz de convertir la energía undimotriz en energía eléctrica. Su estructura es hecha a base de HDPE. La boya de forma cilíndrica oscila de lo largo siendo sostenido en su lugar por dos anclas de 25 lb cada una, atadas a lados opuestos de la boya con cadenas de hierro galvanizado.

Se definió la mejor posición para el generador undimotriz para aprovechar el potencial energético de las olas. Se midió la distancia, la profundidad de la boya y la cantidad de potencia generada. La distancia adecuada es la de 67 ft de distancia, 2.5 ft de profundidad generando hasta un 1.05 Watts.

En *SolidWorks*, se diseñó y experimentó en la estructura de la boya para asegurarnos que esta resistiría las fuerzas del océano. Se hicieron pruebas de presión, fuerza, e impactos, y todos los parámetros resultaron por debajo de los límites estructurales de la boya hecha por HDPE.

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Alicia Reyes, por su asesoría en este trabajo de investigación, a nuestros padres y a nuestros compañeros Ricardo Espinoza y Daniel Bustamante.

REFERENCIAS

- [1] J. Ordoñez, M. Ordoñez y M. Perdomo, «Design of an Underwater Robot for Coral Reef Monitoring in Honduras» *6th International Conference on Control and Robotics Engineering*, 2021.

- [2] R. Pele y R. M. Fujita, «Renewable energy from the ocean,» *Mar. Policy*, Elsevier vol. 26, 2002, pp. 471-479.
- [3] A. P. Masa, «EL MARMOTOR,» *Historia*, p. 3, 2012.
- [4] A. Babarit, «La Energía de las olas» *London: ISTE International*, 2020.
- [5] J. Hitz, «LIMPET: Land Installed Marine Powered Energy Transformer,» *Columbia Climate School*, 2010.
- [6] Whittaker, T., & Folley, M. «The development of Oyster-A shallow water surging wave energy converter» 2007
- [7] J. P. Zapata, «Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del caribe colombiano,» *Espacios*, p. 3, 2018.
- [8] M. A. R. Espinal, «Potencial de Energía Eólica en San Antonio de Oriente, Honduras, Centro América,» *Revista Electronica Entrevista Academica*, pp. 279-288, 2021.
- [9] Y. Silva y I. Herrera, «Diseño de un sistema híbrido fotovoltaico-biomasa para la generación de energía eléctrica en el sector cafetalero de campo redondo-Amazonas,» *Universidad Católica SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO*, 2021.
- [10] EMEC, « WAVE DEVICES,» 2017
- [11] Straume, L. «Global wave power estimates» <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31768763>, 2014
- [12] S. Vasic y P. Lazarevic «Standard Industrial Guideline for Mechatronic Product Design» 2008.
- [13] A. Rahman y M. Moniruzzaman, «Estimation of energy potential of point absorber buoy type wave energy converter,» 2017.
- [14] J. H. Polinder, Damen y F. Gardner, «Linear PM Generator system for wave energy conversion in the AWS,» *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, 2004, pp. 583-589.
- [15] Ordoñez, Perdomo, & Rivas, «Mechanical Displacement for 3D Printers' Parts Using FEM as Inverse Engineering Method in Honduras» *IOP SCIENCE*, 2021