

Design of an Electric Power Generation System Using Wave Energy in Coastal Areas of Ecuador

Julio Adolfo Dávalos Pilozo; Elías Antonio Navas Yagual , Gonzalo Zabala Ortiz , Emerita Delgado-Plaza
ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable,
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la producción, jadavalo@espol.edu.ec, eliannav@espol.edu.ec

Abstract– The project shows the design of an electricity generation system using clean energy from wave power, which arises from the country’s need to diversify the renewable energy portfolio of the master electricity that plan. The design includes a compressed air generation system through sixty mechanical arms with modified pistons and buoys, harnessing wave energy. And, on the other hand, it incorporates a hydraulic system powered by the compressed air from the first system, which, through five pneumatic pumps and four hydropneumatics tanks, supplies water at 15 bar to a 25 kW turbogenerator. This design was developed through calculations, simulations and 3D modeling, taking into account wave crest and period data from “La Chocolatera” in Salinas-Santa Elena, Ecuador. It is concluded that the design can generate electricity 24 hours a day throughout the year, without depending on wave conditions or other climatic factors. Therefore, despite the total cost of \$537,384.00 which is high for a 25 kW production compared to other clean energy sources, it fulfills the expectations for the diversification of the country’s clean energy sources.

KEYWORDS: WAVE ENERGY, CLEAN ENERGY, ENERGY POTENTIAL, WAVES, WATER, MECHANICAL ARMS

Diseño de un sistema de generación eléctrica empleando energía undimotriz en zonas costeras del Ecuador.

Julio Adolfo Dávalos Piloza; Elías Antonio Navas Yagual, Gonzalo Zabala Ortiz, Emerita Delgado-Plaza
ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable,
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, jadavalo@espol.edu.ec, eliannav@espol.edu.ec

Resumen— El proyecto presenta el diseño de un sistema de generación de electricidad utilizando energía limpia a partir del aprovechamiento de las olas, que surge de la necesidad del país de diversificar el portafolio de energías renovables del plan maestro de electricidad. El diseño cuenta con un sistema de generación de aire comprimido a través de sesenta brazos mecánicos con pistón modificado y boyas, aprovechando la energía undimotriz. Y, por otra parte, con un sistema hídrico que funciona debido al aire comprimido del primer sistema, la cual, mediante cinco bombas neumáticas y cuatro tanques hidroneumáticos, alimenta con agua a 15 bar un turbogenerador de 25 kW. Este diseño se lo realizó mediante cálculos, simulaciones y modelaje en 3D, tomando en cuenta datos de crestas y períodos de olas de “La Chocolatera” en el canton Salinas-Santa Elena. Se concluye que, el diseño puede generar electricidad las 24 horas del día durante todo el año, sin depender del estado de las olas ni otros factores climáticos, por lo que a pesar de que, el costo total es de \$537.384,00, un monto elevado para la producción de 25 kW, en comparación a otras energías limpias, esta cumple las expectativas para la diversificación de las energías limpias del país.

Palabras clave—Undimotriz, Energía Limpia, Potencial Energético, Olas, Brazos Mecánicos

I. INTRODUCCIÓN

A. El cambio climático y su impacto en los sistemas energéticos

Ecuador enfrenta su peor sequía en 61 años, con 19 provincias declaradas en alerta roja por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR), debido a la severidad de las condiciones de sequía, déficit hídrico y los impactos en la generación de energía hidroeléctrica. La provincia del Azuay, responsable del 40% de la producción hidroeléctrica del país, ha sufrido una drástica reducción en los caudales de los ríos que alimentan sus embalses, alcanzando niveles críticos en tan solo 42 días de sequía [1].

B. La crisis energética de Ecuador y el reto de la hidrodependencia

Ecuador tiene una alta dependencia de la energía hidroeléctrica, que representa el 70.15% de la producción total de electricidad [2]. Ante la imposibilidad de importar electricidad de países vecinos, evidencia la necesidad urgente de una reforma en la política energética nacional que diversifique las fuentes de energía renovable. La solución incluye la reactivación de proyectos renovables detenidos,

como el proyecto fotovoltaico Aromo y el proyecto eólico Villonaco III, así como la profundización en el estudio de tecnologías emergentes como la energía undimotriz [3].

C. Energía undimotriz para generación eléctrica sostenible

Este estudio propone el diseño de un innovador sistema para aprovechar la energía undimotriz en la costa ecuatoriana, transformando el movimiento de las olas en energía eléctrica. El sistema utiliza brazos torsionales con boyas flotantes que convierten el oleaje en energía mecánica, accionando bombas que transportan agua a un tanque hiperbárico. En este tanque, el aire comprimido genera una presión constante que impulsa una turbina Pelton acoplada a un generador de 25 kW. Este diseño ofrece una solución sostenible y eficiente para diversificar la matriz energética del país, reduciendo la dependencia de fuentes hidroeléctricas y fortaleciendo la resistencia ante futuras crisis energéticas.

II. Metodología

A. Selección inicial de ubicación

El Ecuador posee una amplia zona costera, sin embargo, existen zonas con un mayor potencial energético, gracias a la investigación de Gloswac en el país tenemos las características de olas, por medio de esta web determinamos que una de las zonas más interesantes para realizar el sistema sería “La Chocolatera”, en la provincia de Santa Elena, debido a la altura de ola superior (Fig. 1).

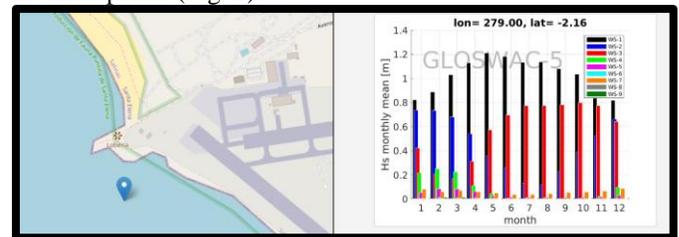


Fig. 1 Promedio de altura de ola durante el año en “La Chocolatera”

B. Diseño conceptual

El diseño conceptual del sistema seleccionado se basa en la utilización de un tanque acumulador de aire comprimido

generado mediante brazos mecánicos con flotadores en contacto con el oleaje. Este aire comprimido se distribuye hacia dos componentes principales: una bomba neumática y un tanque hidroneumático. La bomba neumática succiona agua tratada desde una cisterna subterránea y la transfiere al tanque hidroneumático. Dentro de este tanque, el aire comprimido aumenta la presión y la velocidad del agua, la cual es expulsada a través de los álabes de una turbina Pelton, generando energía mecánica. Esta energía es transformada en electricidad mediante un generador eléctrico acoplado. El sistema opera en un ciclo cerrado, permitiendo que el agua regrese a la cisterna tras accionar la turbina, asegurando un funcionamiento continuo y eficiente.

C. Asunciones

1) *Eficiencias del Sistema*: Se consideraron las siguientes eficiencias:

- Generador eléctrico: 0.8
- Sistema de transmisión mecánica: 0.95
- Turbina hidráulica: 0.85

2) *Condiciones del Oleaje*: Se asumió que las condiciones del oleaje eran estacionarias durante el análisis, con un patrón constante en frecuencia y amplitud.

3) *Resistencia a la Corrosión*: Los componentes expuestos al agua de mar fueron diseñados con materiales resistentes a la corrosión para asegurar una operación continua y sin deterioro significativo.

4) *Presión Constante*: El sistema debe operar con una presión constante del agua de 15 bar para garantizar el correcto funcionamiento de la turbina.

5) *Tiempos y Caudales Operativos*:

- Tiempo de descarga total del tanque hidroneumático: 2 minutos.
- Caudal volumétrico de la bomba neumática: 0.4 m³/min.
- Caudal de aire comprimido de cada bomba neumática: 2.7 m³/min.

6) *Normas utilizadas*: las tuberías cumplen con las especificaciones de la norma ASME B31.3 además, para la corrección de ratings en los accesorios de tuberías como válvulas y bridas que se utilizaron en cada parte del proceso se utilizó la norma: ASME B16.34

D. Cálculos del sistema de agua a presión

Primero se utiliza las eficiencias para alcanzar la potencia mecánica requerida respecto a la potencia eléctrica inicial.

$$W_{mecánica} = \frac{W_{eléctrica}}{\eta_{generador} * \eta_{transmisión}} \quad (1)$$

$\dot{W}_{mecánica}$: Potencia mecánica de la turbina [kW]

$\dot{W}_{eléctrica}$: Potencia eléctrica del generador [kW]

$\eta_{generador}$: Eficiencia del generador

$\eta_{transmisión}$: Eficiencia mecánica en el acople turbina-generador.

Con la potencia se selecciona la turbina en base a la velocidad específica requerida.

$$N_{St,Us} = \frac{(\dot{n},rpm) * (bhp, hp)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{P_{hidrostática}}{\rho g}, ft\right)^{\frac{5}{4}}} \quad (2)$$

Donde:

$N_{St,Us}$: Velocidad específica de la turbina necesaria para el sistema

\dot{n} : Velocidad de rotación del árbol de transmisión de la turbina [rpm]

bhp : Potencia hidráulica [hp]

H : $P_{hidrostática}/\rho g$ = Altura de caída del agua [ft]

$P_{hidrostática}$: Presión del chorro de agua en dirección a los álabes de la turbina $\left[\frac{lbf}{ft^2}\right]$

ρ : Densidad del agua $\left[\frac{slugs}{ft^3}\right]$

g : Gravedad $\left[\frac{ft}{s^2}\right]$

Con la potencia se puede derivar el caudal necesario para la turbina, que es útil para calcular los requerimientos para el tanque hidroneumático.

$$\dot{V} = \frac{W_{hidráulica}}{P_{hidrostática}} * 60 \quad (3)$$

\dot{V} : Caudal volumétrico desde el tanque hidroneumático $\left[\frac{m^3}{min}\right]$

El diseño de tanques hidroneumáticos se fundamentó en la ley de Boyle-Mariotte, que establece la relación presión-volumen en procesos isotérmicos. Según esta ley, el volumen efectivo (V_{ef}) corresponde a la suma del volumen útil (V_{ut}), definido como el agua almacenada y suministrada durante el apagado de la bomba, y el volumen ocupado por el aire comprimido (V_{bar}). El volumen total (V_{tanque}) incorporó el V_{ef} más un margen de estabilidad denominado volumen remanente (V_{rem}), equivalente al 25% del V_{ef} calculado en [4]:

$$V_{út} = \dot{V} * t \quad (4)$$

$$V_{ef} = V_{út} + V_{bar} = V_{út} * \frac{P_{max} + P_{min}}{P_{max} - P_{bar}} \quad (5)$$

$$V_{tanque} = V_{ef} + V_{rem} = 1.25V_{ef} \quad (6)$$

Previa determinación del volumen útil de los depósitos hidroneumáticos y del tiempo máximo disponible para su recarga previo al siguiente ciclo, se estimó el caudal volumétrico requerido por la bomba neumática, incorporando un margen de seguridad de 0.2 min al tiempo de llenado.

$$\dot{V}_{pump} = \frac{V_{út}}{t - 0.2} \quad (7)$$

$$N_{pump} = \frac{\dot{V}_{pump}}{\dot{v}_{disponible}} \quad (8)$$

\dot{V}_{pump} : Caudal necesario para rellenar en el tiempo disponible el volumen útil de cada depósito hidroneumático. $\left[\frac{m^3}{min}\right]$

N_{pump} : Número de bombas neumáticas necesarias en total a usarse en el sistema.

$\dot{V}_{disponible}$: Caudal volumétrico disponible de cada bomba neumática, se asumió $0.4 \text{ m}^3/\text{min}$. $[\frac{\text{m}^3}{\text{min}}]$

Las bombas neumáticas operan mediante aire comprimido, sustituyendo energías convencionales (eléctrica/térmica). Para el modelo Fullflow 502, con un caudal volumétrico de $0.4 \text{ m}^3/\text{min}$, se requirió un flujo de aire de $2700 \text{ NI}/\text{min}$. Tras la conversión de unidades a 4 bar de presión, este flujo de aire equivalió a $0.54 \text{ m}^3/\text{min}$, determinando así la demanda específica del sistema neumático para su activación.

$$\dot{V}_{aire} = N_{pump\ total} * 0.54 \quad (9)$$

\dot{V}_{aire} : Caudal de aire comprimido a 4 bar que deberán generar todos nuestros mecanismos de brazo mecánico, pistón y boya. $[\frac{\text{m}^3}{\text{min}}]$

E. Geometría del brazo hidroneumático

En cuanto al brazo undimotriz se analizó su geometría para optimizar la fuerza que actúa en el pistón respecto al movimiento que tiene esta con el movimiento de las olas (Fig.2)

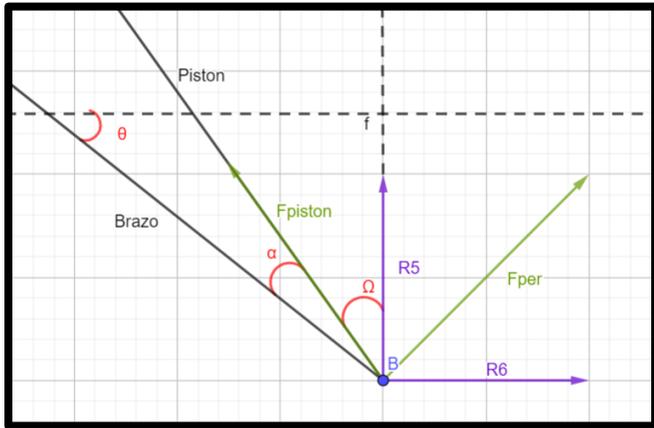


Fig. 2 Geometría del brazo undimotriz, variables de ángulos y reacciones de fuerzas.

Con esta geometría se calculan las reacciones a través de las ecuaciones (10) y (11).

$$F_{piston} = R_5 * \cos \cos \Omega - R_6 * \sin \sin \Omega \quad (10)$$

$$F_{per} = R_5 * \sin \sin \Omega + R_6 * \cos \cos \Omega \quad (11)$$

F_{piston} : fuerza que actúa de manera colineal en el pistón [N]

F_{per} : Fuerza que actúa perpendicularmente al pistón [N]

Mediante estas ecuaciones se puede iterar los ángulos para maximizar la fuerza del pistón y disminuir la fuerza

perpendicular para definir la mejor geometría, esto se analiza posteriormente en los resultados. Estas fuerzas cambian dependiendo del momento que se ejerce, que en parte depende de la altura de ola y el ángulo que se forma, por lo que se define con la siguiente ecuación:

$$M(\theta) = M_{max} * \sin \left(\frac{\pi}{(\theta_{max} - \theta_{min})} * (\theta - \theta_{min}) + \delta \right) \quad (12)$$

θ_{max} : Ángulo con la altura máxima de ola [grados]

θ_{min} : Ángulo con altura de ola de 0 [grados]

M_{max} : Momento máximo [Nm]

δ : desfase de la función [grados]

Una vez calculado la geometría final se procede a estimar la carrera que tendrá el pistón de aire, con esto se calcula la presión y posteriormente el caudal de aire que proveen las olas.

$$\underline{BA} = \frac{OA * \cos \cos \theta}{\sin \sin \left(\frac{OA * \cos \cos \theta}{OA * \sin \sin \theta + BO} \right)} \quad (13)$$

\underline{BA} : Carrera del pistón [m]

\underline{OA} : longitud entre 2 puntos [m]

\underline{BO} : Altura del soporte [m]

$$\frac{F_{piston}}{Area_{piston}} = Presion(\theta) \quad (14)$$

Presión: Presión necesaria para el funcionamiento del sistema [bar]

$Area_{piston}$: Área de la cámara del pistón [m^2]

F_{piston} : fuerza que actúa de manera colineal en el pistón [N]

$$\frac{(\underline{BA}_{inicial} - \underline{BA}_{final}) * Area_{piston}}{T} = Caudal(\theta) \quad (15)$$

\underline{BA}_{final} : carrera del pistón en el punto más bajo de ola [m]

$\underline{BA}_{inicial}$: Carrera del pistón en el punto más alto de la ola [m]

$Area_{piston}$: Área de la cámara del pistón [m^2]

T: Periodo de la función [s]

$Caudal(\theta)$: Caudal de aire comprimido a 4 bar que puede generar cada mecanismo de brazo mecánico, pistón y boya. $[\frac{\text{m}^3}{\text{min}}]$

III. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos derivado de los diferentes cálculos e iteraciones realizadas para el diseño seleccionado.

La Tabla I muestra los requerimientos fundamentales del generador eléctrico para el sistema de energía undimotriz. Se destaca una eficiencia del 80% y una transmisión mecánica del 95%, con una velocidad síncrona de 1800 rpm, lo que permite alcanzar una potencia eléctrica de 25 kW.

TABLA I
TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL GENERADOR DE ELECTRICIDAD

Generador		Unidades
Eficiencia del generador	0,8	-
Eficiencia de transmisión	0,95	-
Velocidad síncrona	1800	rpm
Potencia eléctrica	25	kW

En la Tabla II se presenta los parámetros clave de la turbina Pelton utilizada en el sistema. La turbina tiene una eficiencia del 85% y una potencia hidráulica de entrada de 38,70 kW. Se destaca la presión hidrostática del agua de 1500 kPa y un cabezal relativo de aproximadamente 503 pies, características que permiten una conversión eficiente de la energía.

TABLA II
TABLA DE CARACTERIZACIÓN DE TURBINA

Turbina Hidráulica		Unidades
Potencia mecánica (Salida)	32,89	kW
Eficiencia de turbina	0,85	-
Potencia hidráulica (Entrada)	38,70	kW
Presión hidrostática del Agua	1500	kPa
Cabezal relativo	502,95	ft
Velocidad específica de la turbina ideal	5,44	-
Turbina ideal	<i>Impulso (Pelton)</i>	

El sistema requiere un caudal de salida de 1,55 m³/min y opera con dos depósitos hidroneumáticos por ciclo de descarga (Tabla III). Cada tanque tiene un volumen total de 15,48 m³ y una presión máxima de 19 bar, con una presión de pre-carga de 10,5 bar para garantizar un flujo estable hacia la turbina. Para la recarga de los tanques, se emplean cinco bombas neumáticas, con un caudal volumétrico de 0,4 m³/min cada una, totalizando un flujo de aire comprimido de 2,7 m³/min (Tabla IV).

TABLA III
TABLA DE PRESIONES Y NUMERO DE DEPÓSITOS REQUERIDOS PARA EL SISTEMA

Depósitos Hidroneumático		Unidades
Caudal Volumétrico de Salida	1,55	m ³ /min
Volumen útil	3,10	m ³
Presión Máxima	19,00	bar
Presión de Pre-Carga	10,5	bar
Volumen de Aire Comprimido	9,29	m ³
Volumen Efectivo	12,38	m ³
Volumen Total del Tanque	15,48	m ³

Numero de depósitos (por proceso de descarga)	2	-
Por depósito		
Volumen útil	1,55	m ³
Volumen de aire comprimido	4,64	m ³
Volumen efectivo	6,19	m ³
Volumen total del depósito	7,74	m ³
En Total		
Numero de procesos para mantener el chorro continuo	2	-
Volumen mínimo de agua necesaria para los depósitos (Cisterna)	6,19	m ³
Volumen de Aire Comprimido en Pre-Carga	18,58	m ³
Caudal para recargar la precarga	0,15	m ³ /min

TABLA IV
TABLA DE REQUERIMIENTOS DE LA BOMBA HIDRONEUMÁTICA

Bombas neumáticas (Bombeo Agua)		Unidades
Caudal volumétrico de la bomba	1,63	m ³ /min
Caudal disponible por bomba	0,4	m ³ /min
Numero de bombas necesarias	5	-
Caudal de aire comprimido por bomba neumática	0,54	m ³ /min
Caudal total de aire comprimido para las bombas neumáticas	2,7	m ³ /min

En las Tablas V y VI se presenta la evolución de la geometría del brazo mecánico. En la configuración inicial, la fuerza colineal sobre el pistón alcanzaba 25,616 N con una ola de 0,85 m y 42,559 N con una ola de 1,2 m. Sin embargo, tras iteraciones, se logró optimizar el diseño reduciendo la fuerza perpendicular y aumentando la fuerza aplicada al pistón en un 60%. Esto mejora la eficiencia del sistema sin incrementar esfuerzos innecesarios.

TABLA V
GEOMETRÍA INICIAL PROPUESTA DEL BRAZO MECÁNICO

Altura de ola(m)	T(s)	OA (m)	BO (m)	F _{pistón} (N)	F _{perpendicular} (N)
0,85	8,00	1,87	2,00	25616,27	65069,51
0,85	14,00	1,87	2,00	14637,87	37182,58
0,85	16,00	1,87	2,00	12808,14	32534,76
1,20	8,00	1,87	2,00	42559,42	136517,22
1,20	14,00	1,87	2,00	24319,67	78009,84
1,20	16,00	1,87	2,00	21279,71	68258,61

TABLA VI
 GEOMETRÍA FINAL DEL BRAZO MECÁNICO DESPUÉS DE LAS
 ITERACIONES EN LA CONFIGURACIÓN DE LAS DIMENSIONES

Altura de ola(m)	T(s)	OA (m)	BO (m)	F _{pistón} (N)	F _{perpendicular} (N)
0,85	8,00	0,80	3,50	104888,54	44098,44
0,85	14,00	0,80	3,50	59936,31	25199,11
0,85	16,00	0,80	3,50	52444,27	22049,22
1,20	8,00	0,80	3,50	216172,20	94787,93
1,20	14,00	0,80	3,50	123526,97	54164,53
1,20	16,00	0,80	3,50	108086,10	47393,97

En las Figuras 3 y 4 se muestra las simulaciones de la boya con alturas de olas de 0,8 y 1,2 metros, validando el comportamiento dinámico de la estructura. En las Figuras 5 y 6, se ilustra los análisis de tensiones y deformaciones en el brazo mecánico, asegurando que el diseño soporta las cargas sin comprometer su integridad estructural.

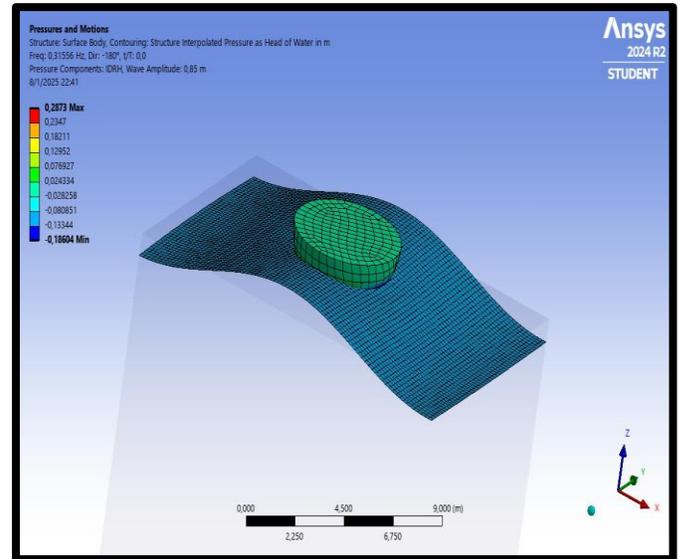


Fig. 4 Simulación de la boya con altura de ola de 1,2 metros de altura

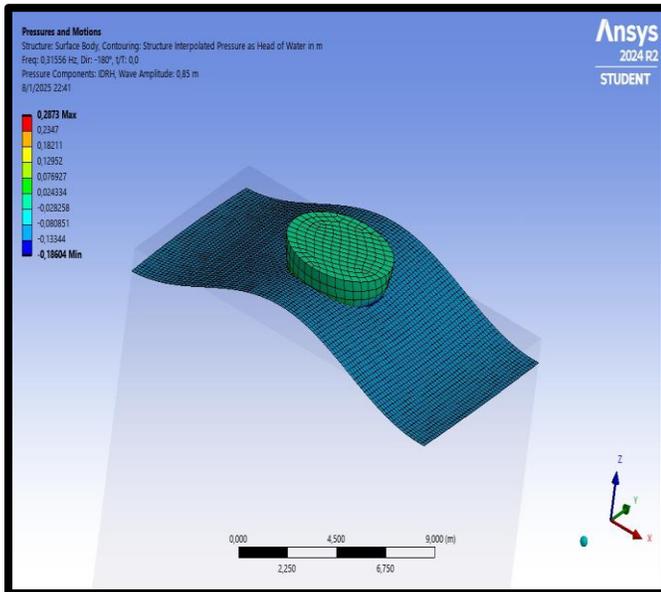


Fig. 3 Simulación de la boya con altura de ola de 0,8 metros de altura

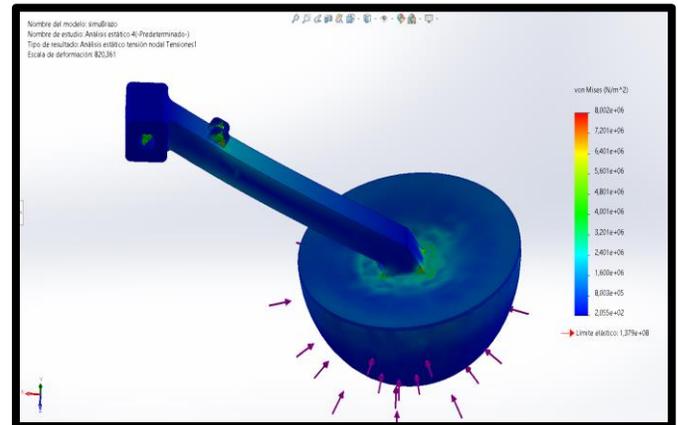


Fig. 5 Simulación de tensiones en el brazo undimotriz

Las Figuras 7, 8 y 9 presentan los resultados de simulaciones de fatiga en el brazo mecánico. Se realizó un millón de iteraciones equivalentes a 20 años de operación, confirmando la durabilidad del sistema sin riesgo de falla.

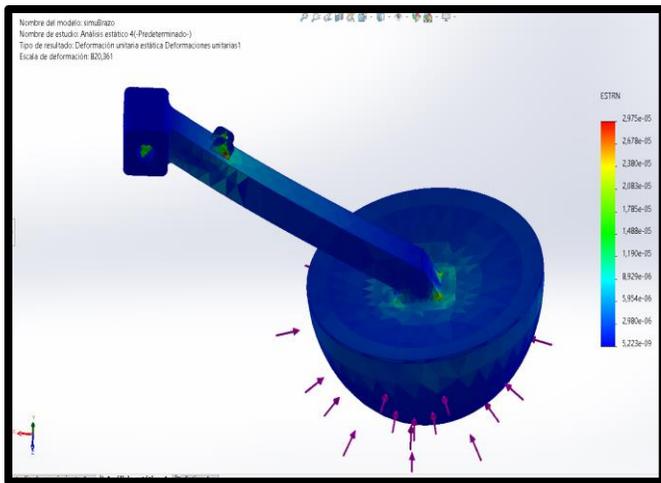


Fig. 6 Simulación de deformaciones en el brazo undimotriz

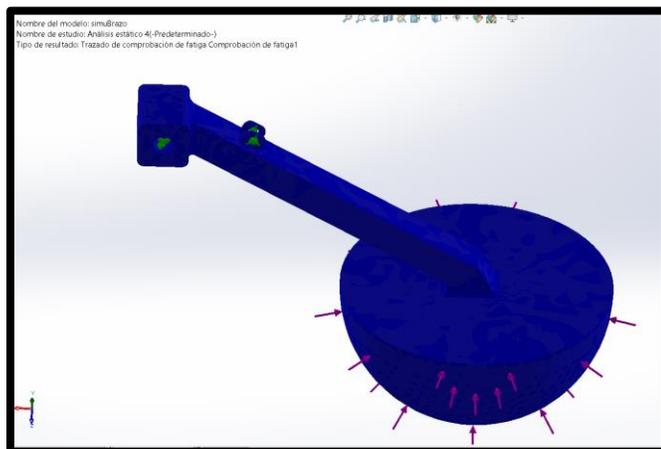


Fig. 7 Gráfica de Simulación de Fatiga en el Brazo Mecánico aplicado a Vida Infinita

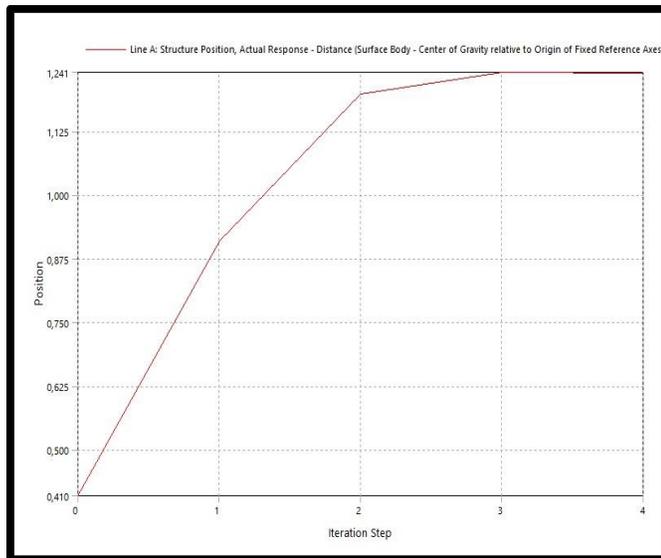


Fig. 8 Gráfica de Simulación de Fatiga en el Brazo Mecánico aplicado a Vida Infinita

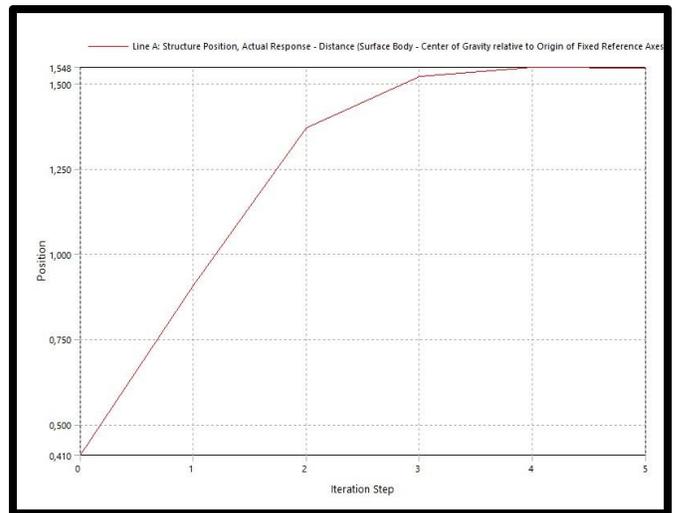


Fig. 9 Gráfica de Simulación de Fatiga en el Brazo Mecánico aplicado a Vida Infinita

En las Tablas VII y VIII se muestra la cantidad de brazos mecánicos requeridos según la presión de aire comprimido generada. Para una presión de 433,09 kPa, se requiere entre 26 y 52 brazos, mientras que para 1085,57 kPa, se requiere entre 4 y 8 brazos. Esto demuestra que en condiciones favorables de oleaje, solo la mitad de los brazos son necesarios para la producción de 25 kW, lo que facilita el mantenimiento del sistema.

TABLA VII

Geometría del pistón y Número de Brazos necesarios para generar aire comprimido a una presión de 433,09 kPa luego de las simulaciones

T (s)	Altura de ola (m)	$F_{\text{pistón}}$ (N)	$A_{\text{pistón}}$ (m ²)	Caudal (m ³ /min)	Brazos
8	0,831	97234	0,11	0,11	26
14	0,831	55562	0,11	0,06	45
16	0,831	48617	0,11	0,05	52
8	1,138	201044	0,11	0,15	19
14	1,138	114882	0,11	0,08	32
16	1,138	100522	0,11	0,07	37

TABLA VIII

Geometría del pistón y Número de Brazos necesarios para generar aire comprimido a una presión de 1085,572 kPa luego de las simulaciones

T (s)	Altura de ola (m)	F _{pistón} (N)	A _{pistón} (m ²)	Caudal (m ³ /min)	Brazos
8	0,831	97234	0,045	0,042	4
14	0,831	55562	0,045	0,024	7
16	0,831	48617	0,045	0,021	8
8	1,138	201044	0,045	0,058	3
14	1,138	114882	0,045	0,033	5
16	1,138	100522	0,045	0,029	6

En la Tabla IX se compara los costos, vida útil y producción energética de diferentes fuentes renovables. La energía undimotriz, aunque tiene un costo de inversión alto, ofrece una producción energética constante de 10-20 kW/m² sin depender de condiciones climáticas, a diferencia de la solar o la eólica, que requieren baterías y condiciones específicas para operar.

TABLA IX

Comparación de energía undimotriz frente a otras energías renovables

Energía Renovable	Inversión Inicial	Costo de mantenimiento	Vida útil (años)	Producción Energética (kWh/día limitado a 5m ²)
Solar Fotovoltaica	Alto	Bajo	20-30	20-30 kW
Eólica Terrestre	Alto	Moderado	15-20	8-12 kW (Con vientos de 5-8 m/s)
Biomasa	Moderado	Alto	20-25	5-15 kW (Residuos agrícolas y forestales)
Hidroeléctrica	Alto	Moderado	40-50	1-5 kW (Proporciones reducidas)
Geotérmica	Alto	Moderado	20-25	1-3 kW (limitada por espacio)
Energía undimotriz	Muy Alto	Moderado	25-30	10-20 kW

IV. DISCUSIÓN

El objetivo del diseño del Sistema de Generación Eléctrica a partir de Energía Undimotriz, empieza por seleccionar un generador de 25 kW, cuyas características se describen en la Tabla I. Para ello, se asignaron valores de eficiencia comunes con el fin de compensar las pérdidas. En la Tabla II, considerando las pérdidas por transmisión de la turbina, se determinó la necesidad de utilizar una turbina Pelton, dado que se cuenta con una presión de agua equivalente a aproximadamente 500 metros de altura hidrostática y una velocidad específica de 5,44 en unidades de Estados Unidos.

En la Tabla III se mencionan las presiones necesarias de los depósitos de agua, destacándose la presión de precarga de 10,5 bar que constituye el principal requerimiento para su operación. Además, se resalta el número de procesos, aspecto importante debido a la necesidad de los depósitos hidroneumáticos de contar con un tiempo de recarga de presión para mantener su funcionamiento. Por lo tanto, al añadir más depósitos, es posible lograr una descarga de agua continua hacia la turbina Pelton.

De manera similar, se analizaron las bombas neumáticas considerando los requerimientos de llenado de los depósitos descritos en la tabla anterior, logrando que llenen cada proceso mucho antes del tiempo de descarga para que ocurra el proceso de aumento de presión. En la Tabla IV se determinó el número de bombas necesarias y el caudal requerido.

En la Tabla V se presenta la geometría inicial del brazo captador de las olas, basada en las dimensiones de proyectos previos. Sin embargo, durante las iteraciones se logró optimizar los resultados para obtener una mayor fuerza dirigida directamente al pistón, sin aumentar la fuerza perpendicular a este. En comparación con la configuración inicial, como se muestra en la Tabla VI, se logró un aumento de aproximadamente el 60% en la fuerza aplicada al pistón, mientras que la fuerza perpendicular, que representa la parte de la fuerza que no actúa directamente, se redujo en un 40%. Este resultado permite un mejor aprovechamiento del movimiento del brazo.

Mediante las simulaciones, a pesar de la limitación de no simular la estructura completa, se optó por la simulación de la boya con sus propiedades físicas y compensación, garantizando que el movimiento relativo respecto al oleaje es cercano a lo real. En las Figuras 3 y 4 se observa, además del comportamiento dinámico, las presiones ejercidas por el oleaje sobre la estructura. Al no presentarse ningún esfuerzo que comprometa la integridad de esta, se confirma la seguridad del diseño.

En las Figuras 5 y 6 se destaca que, aunque se observan puntos de tensión y deformación en las principales conexiones de movimiento del brazo, estos no representan un riesgo significativo para la integridad de la estructura. El cambio de color, que varía de azul a rojo, indica lo cerca que se encuentra el material de alcanzar su límite de falla. Dado que no se

identifican puntos rojos, se puede afirmar con confianza que este es un diseño seguro.

Con los resultados simulados mostrados en la Figura 7, el brazo fue sometido a 1,000,000 de iteraciones, lo que equivale a un periodo aproximado de 20 años. Al no evidenciarse cambios significativos durante estas iteraciones, se confirma que el brazo podrá soportar las fuerzas durante este tiempo sin comprometer su funcionalidad.

A partir de las simulaciones en el programa de simulación ANSYS AQWA mostradas en las Figuras 8 y 9, se determinó que el sistema requiere 60 brazos, una cantidad considerable de equipos, para la generación de energía. Aunque la cantidad es importante, todos los brazos no son usados en el año, no resulta necesario ya que como se observa en las tablas VII y VIII. En las épocas favorables de olas, solo la mitad de los brazos son necesarios para producir los 25kW, se puede aprovechar para realizar el mantenimiento de los equipos. Esto asegura una generación continua de energía del sistema y su duración a lo largo de los años.

En comparación con otras energías renovables, la alternativa planteada ofrece varias zonas de ubicación potencial como se muestra en la tabla IX, dado que Ecuador tiene una extensión costera amplia, a diferencia de la eólica que requiere de amplios valles con vientos para su funcionamiento, y la geotérmica que debido a sus grandes estructuras y condiciones específicas para su funcionamiento se ve limitada. Aunque los costos iniciales pueden percibirse como mayores en relación con fuentes como la energía solar fotovoltaica o la eólica, es importante destacar que estas últimas no son recursos constantes: la energía solar es efectiva solo durante parte del día y bajo condiciones de baja nubosidad, mientras que la energía eólica depende de la presencia de viento. Por lo tanto, estas energías requieren baterías para almacenar la electricidad, las mismas son costosas y requieren ser reemplazadas cada cierto tiempo. En contraste, la energía de las olas actúa de manera continua, tanto de día como de noche, lo cual representa una gran ventaja, además no depende de condiciones climáticas como la energía hidroeléctrica. A pesar de las variaciones en la intensidad del oleaje, la producción no se detiene una vez que el sistema entra en operación.

Finalmente se presenta el diseño final del Sistema de Generación Eléctrica a partir de Energía Undimotriz, representado en las figuras 10, 11, 12, 13 y 14.

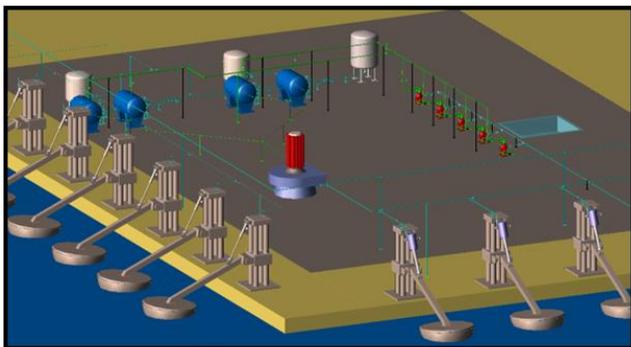


Fig. 10 Sistema de Generación Eléctrica a partir de Energía Undimotriz.

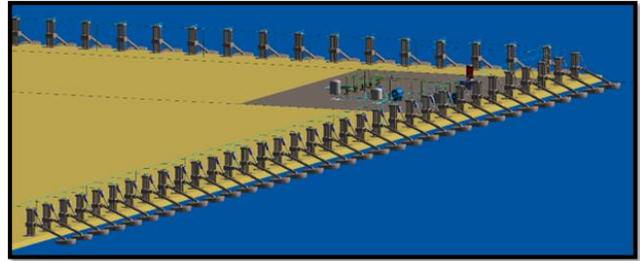


Fig. 11 Brazos Mecánicos restantes para la Producción de Aire Comprimido de 4 bar y 10.5 bar en contacto con el Mar

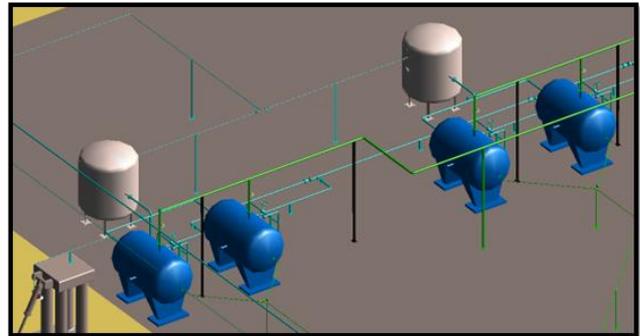


Fig. 12 Sistema de Tanques Hidroneumáticos

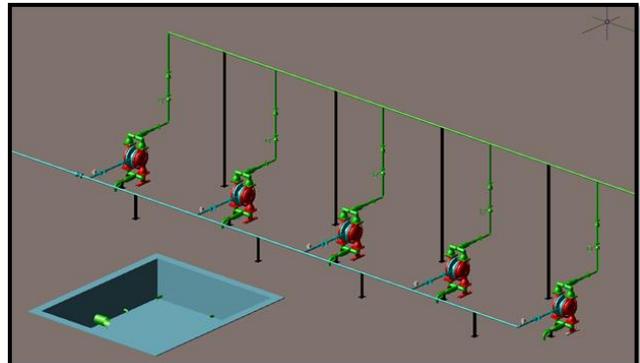


Fig. 13 Sistema de Bombas Neumáticas con la Cisterna de Agua

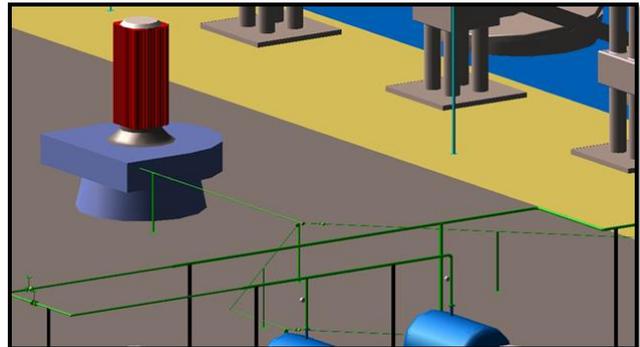


Fig. 14 Turbogenerador de 25 kW

V. CONCLUSIÓN

Se diseñó por completo el sistema, para la generación de 25kW aprovechando la energía undimotriz, el cual está

compuesto por 60 brazos mecánicos, 5 bombas neumáticas, 4 tanques hidroneumáticos, 2 tanques acumuladores de aire comprimido, 1 tanque para el procesamiento de condensados, 1 cisterna de agua y 1 turbogenerador es fundamental indicar que dicho diseño fue analizado con el peor mes del año en cuestión de cresta y período de ola.

El diseño del brazo mecánico está comprobado por simulaciones en SolidWorks, tanto estáticas de tensiones o deformaciones, como dinámicas de fatiga donde se observó una excelente interacción con las olas del mar en un período de trabajo de 20 años, sin riesgo a fallas.

Se diseñó el sistema, usando datos comprobados en simulaciones en ANSYS AQWA sobre la interacción de la boya con las crestas de olas analizadas en el estudio del potencial energético en la ubicación localizada en la “La Chocolatera”, Salinas, Ecuador. Procurando acercar el funcionamiento del diseño aún más a la realidad.

El sistema tiene una producción más constante, diseñándose para funcionar sin parar todo el año, a diferencia de la solar que solo trabaja durante la jornada diurna, la hidroeléctrica que en sequías no funciona, o la eólica que depende mucho de las ráfagas de viento.

La producción energética en el Ecuador tiene una gran desventaja en comparación a las otras, pues el potencial energético por metro de ola en el país es muy bajo. Requiriendo un gran número de brazos mecánicos para aumentar la generación eléctrica, lo cual no sería eficiente.

A pesar de que el mantenimiento del sistema undimotriz no sería costoso, al no estar introducido en el mar, el costo de implementación en la vida real sigue siendo elevado para el beneficio energético que se obtiene. Sin embargo, el sistema es eficiente, puesto que, si se instalara en alguna zona con más cresta de ola que la disponible en el Ecuador, el número de brazos, conexiones de tuberías, bombas neumáticas y los distintos tanques se verían reducidos al mismo tiempo que la generación eléctrica se vería aumentada.

Referencias

- [1] Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, “Resolución de alerta roja en 19 provincias de Ecuador debido a la crisis climática,” 21 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2024/09/RESOLUCION-DE-ALERTA-ROJA-21-09-24-so-tn-signed.pdf>.
- [2] M. Saenz, “Crisis de energía en Ecuador: Evaluación de la situación al 28 de octubre 2024,” ResearchGate, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Melio-Saenz/publication/385439169_Crisis_de_Energia_en_Ecuador_Evaluacion_de_la_Situacion_al_28_de_octubre_2024/links/6724e7c5ecbbde716b522243/Crisis-de-Energia-en-Ecuador-Evaluacion-de-la-Situacion-al-28-de-octubre-2024.pdf. [Accedido: 28-ene-2025].
- [3] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2019). Capítulo 4: Plan de Expansión de Generación. En Plan Maestro de Electricidad del Ecuador (pp. 138-175). Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/4.-EXPANSION-DE-LA-GENERACION.pdf>
- [4] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, “Resumen ejecutivo,” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/10/1-Capi%CC%81tulo-1-Resumen-Ejecutivo.pdf>. [Accedido: 28-ene-2025].
- [5] A. Herrán-Sandoval, “Tanques hidroneumáticos: Cálculo de la capacidad,” Tecnología y Ciencias del Agua, vol. 5, no. 4, pp. 163–171, 2014. B. Simpson, et al, “Title of paper goes here if known,” unpublished.
- [6] Athaluri, S. K. (2014). Energy harvesting from ocean waves by SAN-BAWEC (Simple and Nonstop-Buoyant arm Wave Energy Converter). International Journal of Innovative Research & Development, 3(10), 180-183. <https://www.researchgate.net/publication/289211431>
- [7] Castaño-Serna, J. P., & Chica-Arrieta, E. (2023). Selección de un convertidor de energía de las olas de tipo oscilante y un sistema de toma de fuerza para el aprovechamiento de la energía undimotriz de Colombia. Revista UIS Ingenierías, 22(2), 141-166. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023012>
- [8] Chimbo Rodríguez, L. (2017). Aprovechamiento de la energía undimotriz en Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13818/1/ing_vs_v17_Chimbo_Rodr%C3%ADguez.pdf
- [9] Heath, T. V. (2012). A review of oscillating water columns. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1959), 235–245. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0164>
- [10] Hernández Santana, J. R., Méndez Linares, A. P., & Ordaz Hernández, A. (2022). La energía undimotriz en el contexto de las energías sustentables. Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano. <https://cemioceano.mx/downloads/libros/Libro-Energia-Undimotriz-Cap%201.pdf>
- [11] Zhang, J., Tahir, U. B., & Manasseh, R. (2024). *Maximal electric power generation from varying ocean waves with LC-tuned reactive PTO force.* IEEE Transactions on Sustainable Energy. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.08360>