

Diseño de un prototipo basado en el tornillo de Arquímedes para la generación de energía eléctrica y el aprovechamiento de estructuras de protección portuaria nacional.

María Dolores Servín Lugo, Etelberto D. Serrano Flores, José Ángel Hernández Peña, Cindy Casas Valencia

dservin@imt.mx, eserrano@imt.mx, Angel.Pena@imt.mx, ccasas@imt.mx

Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera, Instituto Mexicano del Transporte, Carretera El Colorado - Galindo Km. 12+000 Col. San Fandila, 76703 Pedro Escobedo, Qro.

Introducción

La superficie de nuestro planeta cuenta con aproximadamente tres cuartas partes de agua, dentro de este porcentaje contamos con mares y océanos que a través de los fenómenos físicos ondulatorios como son las mareas y el oleaje, pueden proveer grandes beneficios en cuestión de energía renovable. La superficie de los océanos está estimada en 361'000,000 km², que equivale a tres cuartas partes de la totalidad del planeta. Poseen una profundidad media de 3,900 m (con excepciones conocidas de mayor profundidad, como la fosa de las Marianas de 11,034 m), lo cual representa aproximadamente 1'300,000,000 km³ de volumen, es decir, el 94% del agua del planeta.



Figura 1 Los océanos del mundo y sus características

Fuente: <https://proyectoviajero.com/mapas-mundo/mapa-de-los-continentes/>

De ahí la importancia de aprovechar la energía del mar, la cual se refiere a la energía renovable transportada por las olas del mar, las mareas, la salinidad y la diferencia de temperatura del océano.

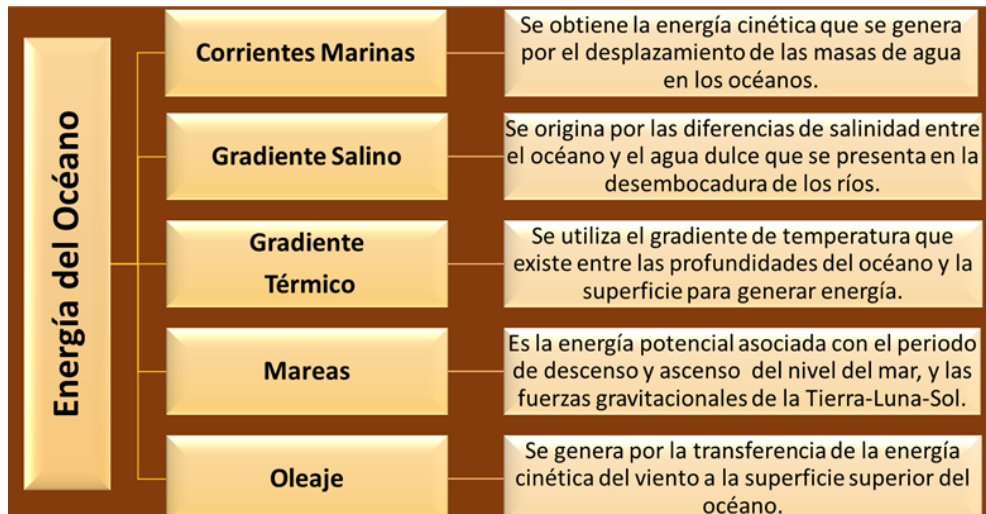


Figura 2. Clasificación de la energía del océano

Energía Undimotriz

La energía que se almacena en las olas se le conoce también como energía undimotriz y se origina a partir de la incidencia del sol sobre la atmosfera creando gradientes de presión y temperatura que generan un flujo de aire a gran escala o viento, el cual es el principal generador del oleaje al ejercer presión sobre el agua en el océano. Uno de los puntos de mayor relevancia en la energía undimotriz, se basa en estimar el potencial de energía que es capaz de acumular una ola, y determinar sus características teóricas y físicas, para así poder garantizar no solo un buen entendimiento, sino una buena eficiencia de los mecanismos y sistemas.



Figura 3. Generación de las olas

Fuente: <https://ovacen.com/energias-renovables/undimotriz-olamotriz/>

Las principales características de las olas son las siguientes:

El período de ola: Es el intervalo de tiempo entre dos olas sucesivas.

Altura de ola: Se mide tomando la altura de la ola vertical entre una cresta y una vaguada de olas.

La longitud de ola: Es la distancia horizontal entre dos crestas de ondas consecutivas.

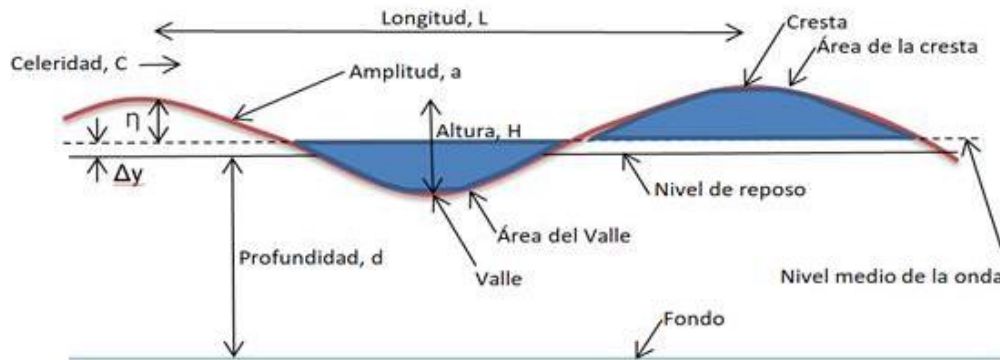


Figura 4. Características de las olas

Fuente: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=533&IdBoletin=192>

Para obtener los valores de las características antes mencionadas, se requiere la medición de oleaje en campo y registros históricos con lo cual se obtienen los parámetros que son importantes para la planeación, el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura portuaria y costera. Los parámetros obtenidos son los siguientes: la altura de ola, el periodo de ola y la dirección de oleaje, los cuales se encuentran disponibles en diferentes fuentes de información en México como son: la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM) del Instituto Mexicano del Transporte, el Atlas de Oleaje Oceánico de México (ATLOOM); así mismo se cuenta con WAVEWATCH III®, que es una base de datos, la cual fue elaborada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de Norteamérica, para el período comprendido entre el 1 de enero de 1979 y el 31 de diciembre de 2009, esta información la mantienen actualizada a la fecha.

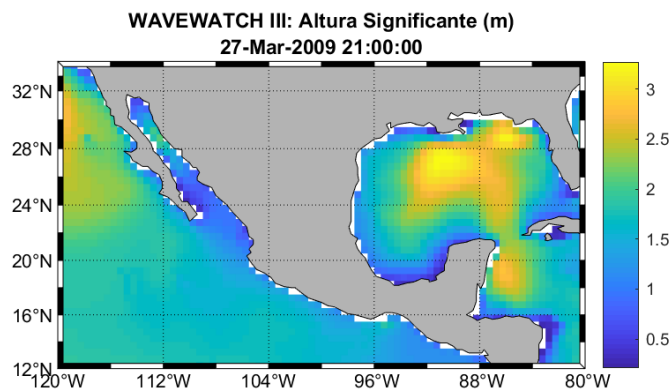


Figura 5. Fuente de información de Oleaje de la Wavewatch III.

El funcionamiento de los sistemas unidimotrices se encuentra basado en la conversión de energía a partir de tres elementos de las olas:

- 1.- El empuje de la ola,
- 2.- La variación de altura en la superficie y

3.- La variación de la presión bajo la superficie.

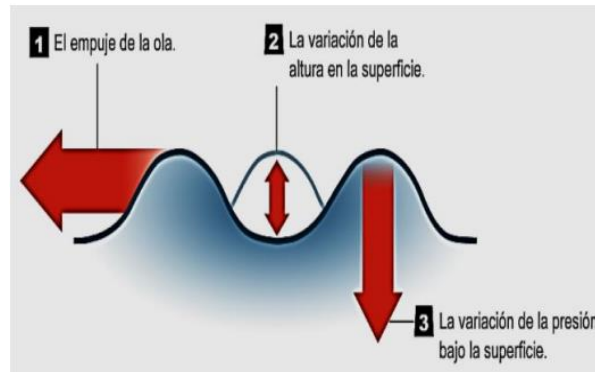


Figura 6. Principales elementos de las olas

Fuente: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72187/fichero/TFM-2187+ESPEJO+SABARIEGO%2C+ALEJANDRA.pdf>

Hay varios tipos de generadores undimotrices, que incluyen dispositivos de flotación, dispositivos de succión y dispositivos de impacto (figura 7). Cada tipo funciona de manera diferente, pero todos utilizan la energía de las olas para mover un generador eléctrico.

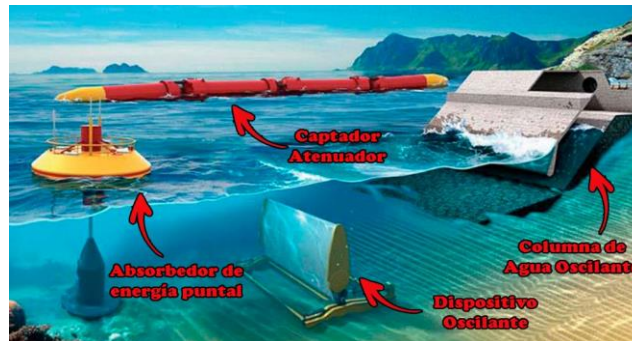


Figura 7. Tipos de generadores undimotrices

Fuente: <https://www.solarpedia.info/wp-content/uploads/2021/10/ejemplos-de-energia-undimotriz-1024x576.jpg>

Dentro de las principales ventajas de la generación de energía undimotriz se pueden destacar las siguientes:

- Es una energía renovable y limpia. No genera emisiones, ni desechos o restos de contaminante en el mar.
- Es una energía segura: para lograr la energía, no es necesario ningún tipo de combustión o explosión.
- Es predecible y confiable.
- No daña la tierra.
- Se puede producir en gran cantidad.
- Es una energía sin ruido: La energía undimotriz es silenciosa.

Como bien ya se mencionaron las ventajas de utilizar este tipo de energía, existen también algunas desventajas tales como:

- No accesible en zonas sin mar.
- Afecta los ecosistemas marinos.
- Obstaculiza la navegación.
- Produce contaminación visual.
- Tecnología cara, elevados costos de inversión.
- Altos costos de mantenimiento.
- Mantenimiento difícil. El deterioro de muchas instalaciones es evidente y se tiene que seguir investigando hasta encontrar materiales e instalaciones que puedan soportar las poderosas olas que son, justamente, la fuente de energía.

La clasificación de los tipos de generadores undimotrices de acuerdo con la orientación o posición relativa al frente del oleaje es la siguiente:

1. *Terminadores*: los cuales están orientados paralelamente al frente de oleaje y su forma es alargada, con esta orientación se capta la mayor energía disponible del oleaje por lo que requieren atención en el diseño de los anclajes al fondo marino.
2. *Atenuadores*: estos van orientados perpendicularmente al frente de oleaje, también son alargados, pero captan el oleaje de forma progresiva. Según estudios de Thomas B. Johansson se captura alrededor del 62% de lo que captura un terminador.
3. *Absorbedor puntual*: como su nombre lo indica, son estructuras puntuales de forma cilíndrica que tienen por ventaja captar oleaje de diferentes direcciones, pero no capturan energía de oleaje de periodos largos por su limitado tamaño, y funcionan mejor colocando varios dispositivos en serie.

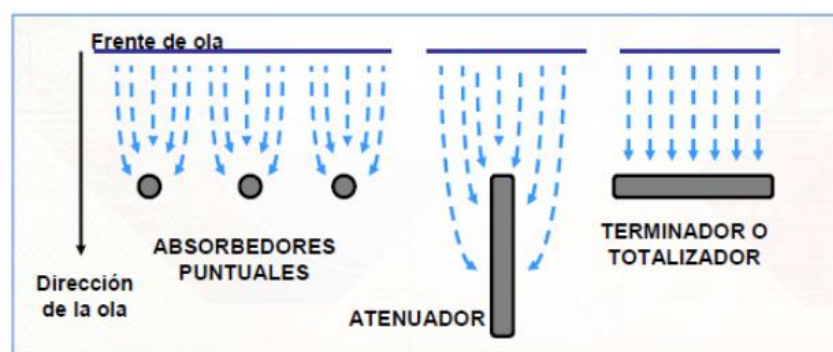


Figura 8. Clasificación de instalaciones de captación conforme a su orientación

Fuente: Píriz G. H. 2017. Cálculo y diseño de una central de energía undimotriz.

Las técnicas de utilización y aprovechamiento de la energía de las olas se presentan de acuerdo con:

- 1.- Empuje de la ola
- 2.- Variación de la altura de la superficie de la ola.
- 3.- Variación de la presión bajo la superficie de la ola.
- 4.- Totalizadores o terminadores

Se les llama dispositivos o convertidores OWC (Oscilating Water Column) a todo dispositivo o mecanismo que convierte y/o transforma la energía que genera una ola, por medio de sistemas que incluyen una fase primaria-mecánica y una secundaria-eléctrica con el uso de transformadores.

En la actualidad la investigación de los OWCs está centrada principalmente en los siguientes sistemas: rompeolas sumergidos, boyas mecánicas, sistemas péndulos, etc. Lo cual deja un amplio margen para estudiar nuevos sistemas con una mayor eficiencia.

Este tipo Columna de Agua Oscilante por sus siglas en ingles OWC, están ubicados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola y son los siguientes:

- a) OWC Rectificador Russel
- b) OWC's Mecánicos
- c) OWC Mecánico de Unión Fenosa
- d) OWC Péndulo
- e) OWC Tapchan, Noruega
- f) Sistemas de bombeo
 - i. OWC, Bomba de manguera
 - ii. OWC, Bomba de Pistón
- g) Sistemas Hidráulicos
 - i. OWC, Frog
 - ii. OWC, Ducko Pato Salter
 - iii. OWC, Cilindro Bristol
 - iv. OWC, Clam
 - v. OWC Raft o Balsa Cockerell
 - vi. OWC Rompeolas Sumergido
 - vii. OWC Pelamis. -Es una estructura semisumergida articulada

Energía undimotriz en México

México cuenta con una ubicación geográfica privilegiada, ya que tiene acceso a los dos océanos más grandes del mundo, el Atlántico y el Pacífico. Sus mares y costas son una parte fundamental del territorio nacional, que cuenta con un litoral costero de aproximadamente 11,122 km, sin tomar en consideración las islas, dentro de este litoral hay actualmente 103 puertos y 15 terminales habilitadas entre las que se encuentran puertos de abrigo, comerciales, industriales, petroleros, pesqueros, turísticos y para fines militares y de seguridad nacional.



Figura 9. Territorio continental de México

Fuente: <http://www.teorema.com.mx/wp-content/uploads/mares-mex01.jpg>

La información de la energía undimotriz en México empleada para el desarrollo de este estudio, se obtuvo de la tesis denominada “Potencial de la energía undimotriz en costas mexicanas y usos potenciales para obtener el grado de Doctor en Ingeniería”, de Erick Iván García Santiago.



Figura 10. Sitios con mayor potencial de energía undimotriz en las costas de México (Adaptado de García 2014)

Fuente: <https://cemioceano.mx/Tesis/pdf/GarciaSEI%202019%20-%20Potencial%20de%20la%20energía%20undimotriz.pdf>

“De acuerdo a datos obtenidos del portal de CFE y de la UNAM, en México hasta 2013 solo había registro de cuatro proyectos relacionados con el aprovechamiento de la energía marina, aunque actualmente se desconoce la situación de cada uno de ellos, a continuación, se enlistan en orden cronológico estos proyectos:

1. En 1974 CFE desarrolló un estudio de factibilidad para el aprovechamiento de la energía contenida en el oleaje y generar energía eléctrica.
2. En 1996 la UNAM efectuó el proyecto SIBEO para desarrollar un sistema de bombeo por energía de oleaje.
<http://www.fenomec.unam.mx/SIBEO/sibeo.html>
3. En 2005 CFE aplica tecnología de patente australiana (energía de oleaje de columna de agua oscilante, OWC) de la empresa Oceanlinx Ltd.
4. En 2013 el Gobierno Federal a través de CFE compró tecnología australiana a la empresa Oceanlinx Ltd para instalar un sistema de columna de agua oscilante (OWC) en Rosarito, Baja California.”

Sin embargo, también existen registros de algunos dispositivos undimotrices mexicanos que alcanzaron la etapa de pruebas bajo condiciones reales de operación y que fueron evaluados en diversos procesos costeros, algunos de estos se enlistan en la tabla siguiente:

Tabla 1.- Pruebas en campo realizadas en México con dispositivos undimotrices [Adaptado de García 2014]

Empresa/Institución	Tecnología/dispositivo	Sitio de pruebas	Año
UAG, ICF-UNAM, IINGEN-UNAM	OWC	Duque de Alba, Acapulco Guerrero	2018
Laboratorio de Investigación Sexto Sol	Boya flotante	Playa Escollera, Rosarito Baja California	2011
RDZ (Renewable Energy Technology)	OWC	Playa Ventanas, Manzanillo Colima	2010
ICMyL-UNAM	SIBEO	Oaxaca	2004
ICMyL-UNAM	Amplificador de oleaje	Puerto Morelos, Quintana Roo	2001
ICMyL-UNAM	REAL	Puerto Morelos, Quintana Roo	1997

Fuente: <https://cemieoceano.mx/Tesis/pdf/GarciaSEI%202019%20-%20Potencial%20de%20la%20energía%20undimotriz.pdf>

En este sentido y con un panorama sostenible con el medio ambiente, en el presente estudio se realizó un análisis del área potencial sobre las estructuras de protección portuarias y costeras que pudiera ser utilizada para adaptar algún mecanismo de aprovechamiento de energía a partir del oleaje para este caso, mediante el diseño de un prototipo basado en el tornillo de Arquímedes el cual aproveche la energía undimotriz, así como la infraestructura de protección portuaria que se encuentra disponible actualmente en el país.

El objetivo principal de este proyecto es abordar la perspectiva sobre la concepción de la infraestructura de protección portuaria y costera, para observarla desde el punto de vista sostenible. Así mismo, determinar los fundamentos para el diseño y aprovechamiento de la energía undimotriz adaptada sobre una estructura de protección portuaria, para la generación y aprovechamiento de energía sostenible.

Para lograr los objetivos planteados, el presente estudio se llevó a cabo con los siguientes alcances, se realizó una investigación documental sobre las tecnologías de generación eléctrica a partir del aprovechamiento de energía undimotriz existente a nivel mundial, se recopiló la información de la infraestructura de protección portuaria con potencial de generación eléctrica a partir de la energía undimotriz que existente actualmente en el país. Se propuso el diseño de un prototipo, de generación eléctrica con base en la sección de la estructura de protección portuaria y costera donde la energía undimotriz se transformará en energía eléctrica, en esta primera etapa se realizó todo dentro de un marco teórico para su posterior construcción y evaluación hidrodinámica, mediante el uso de modelos físicos en el Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT y su posible aplicación en los puertos de México.

Tornillo de Arquímedes

Es un mecanismo que se utilizaba para bombear agua contra la gravedad. Se podía girar por cualquier medio físico, con un molino de viento, o con la mano, este equipo era suma importancia para los agricultores ya que podían irrigar sus tierras.

Para transportar agua de un nivel bajo a un nivel superior era una actividad difícil. Las hélices de giro rápido con que cuenta ayudan a bombear agua y se pueden utilizar para generar electricidad.

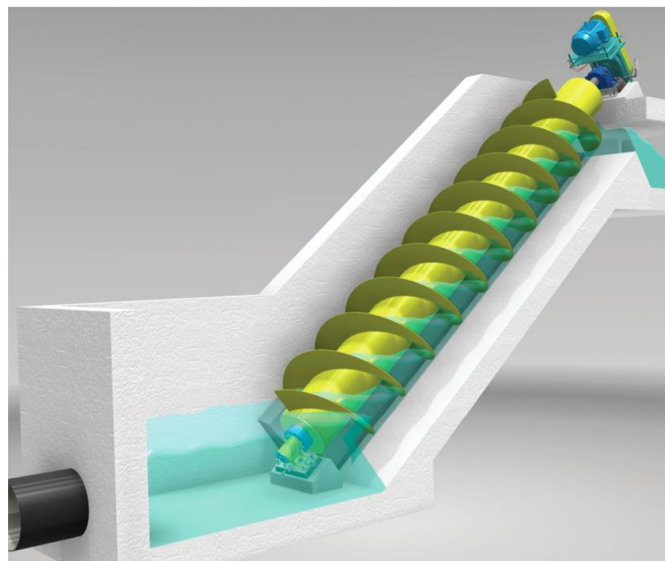


Figura 11. Ejemplo del funcionamiento del tornillo de Arquímedes

Fuente: <https://www.nyfdecolombia.com/aguas-residuales/tornillo-de-arquimedes>

Sus principales características son:

- Tiene un tornillo con superficie geométrica helicoidal que rodea a un cilindro, que está girando dentro de un tubo sobre su propio eje, realizando una trayectoria de forma oscilatoria.

- El tornillo gira, que hace que los elementos que están en la parte inferior asciendan por medio de las hélices que lo rodea.
- El sistema helicoidal permite que, si alguno de los elementos cae de una sección a la otra, la misma sea recogida por la siguiente aspa.
- El flujo del traslado de los elementos se realiza de manera uniforme y continua, debido a que la velocidad de traslado es constante, no se producen pulsaciones, turbulencias, ni agitaciones.
- Sobresale por su simplicidad, cuenta con un solo elemento giratorio a través del rotor, lo que hace que sea una bomba muy simple, ya que no se presentan válvulas, ni engranajes en su diseño.
- Según el diseño, también se puede utilizar de forma inversa, manteniendo su misma inclinación, ejecutando la tarea desde el punto superior haciéndolo girar de manera contraria y de esta manera se trasladan los materiales desde la parte superior a la inferior.

Caso de estudio

Con base al mayor potencial energético del oleaje sobre el litoral mexicano y a la infraestructura de protección costera disponible, se seleccionó el rompeolas del puerto de Ensenada B.C., para elaborar la propuesta del diseño de un prototipo de generación eléctrica a partir de la energía undimotriz.



Figura 12. Vista general del puerto de Ensenada

Fuente: <https://www.puertoensenada.com.mx/upl/sec/vid-comercial.jpg>

Para calcular las dimensiones del diseño del prototipo, se tomó como base la sección tipo del rompeolas del puerto de Ensenada B.C. (Fuente: IMT Proyecto No. VE 17/10).

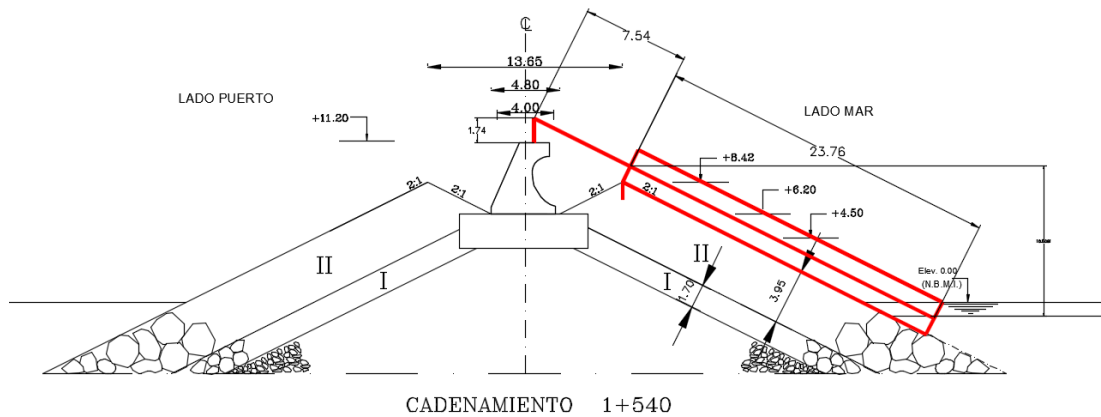


Figura 13. Sección transversal tipo del rompeolas del puerto de Ensenada B.C., cadenamiento 1+540

En la figura 14 se pueden observar los parámetros requeridos para definir la geometría del tornillo de Arquímedes.

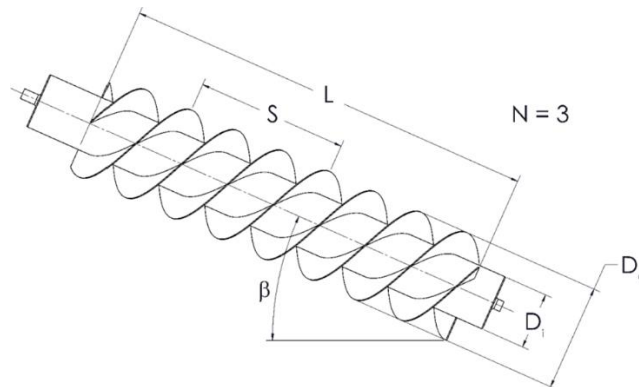


Figura 14. Variables del tornillo de Arquímedes

Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/348208850>

Tabla 2.- Parámetros para el diseño del tornillo de Arquímedes

Parámetro	Descripción	Unidad
L	Longitud del tornillo	m
D_o	Diámetro exterior del tornillo	m
D_i	Diámetro interior del tornillo	m
S	Periodo del tornillo	m
N	Número de superficies planas helicoidales	l
β	Inclinación (ángulo) del tornillo	rad
G_w	Espacio entre el canal y el tornillo	m
Variable	Descripción	Unidad
ω	Velocidad de rotación del tornillo	rad/s
hu	Nivel superior de agua (entrada)	m
hL	Nivel inferior de agua (salida)	m
Q	Tasa de flujo volumétrico a través del tornillo	m ³ /s

Ecuaciones para el cálculo del diseño de un tornillo de Arquímedes

De las dimensiones de la sección transversal de la figura 13, se obtuvieron varias medidas que se utilizaron para calcular las dimensiones del tornillo de Arquímedes las cuales se presentan a continuación:

a) Movimiento a granel en cortas distancias

Para hacer el movimiento a granel en cortas distancias y en línea recta se utiliza la ecuación siguiente:

$$HP = (Fd \times Fb \times FL \times N) / 1000000$$

En donde:

HP = Potencia de operación en vacío

Fd = Factor de diámetro sin fin

Fb = Factor de rodamiento interno

L = Longitud total del sinfín

N = Velocidad

b) Potencia para transportar en plano inclinado

Para poder subir los fluidos de una zona a otra ya sea porque hay una pendiente u otras razones se utiliza esta fórmula:

$$HP = (H \times W \times C) / 3300060$$

En donde:

HP= Potencia para transportar en plano inclinado

H = Altura de inclinación

W = Peso del material

C = Capacidad real

c) Bombeo de diferentes fluidos

Para poder bombear diferentes fluidos se tiene que utilizar la siguiente fórmula:

$$Q = (((d)^2 \times n) / 14500) \times \eta_o$$

En donde:

Q = Caudal

d = diámetro del tornillo sinfín

n = Frecuencia de rotación del tornillo sinfín

$\eta_o = 0,70$

d) Altura del salto

Fórmula:

$$H = Le \times \text{sen}(\theta)$$

En donde:

H=Altura del salto

Le= Longitud del tornillo

θ = Ángulo de inclinación del diente

e) Potencia teórica

Fórmula:

$$PotTeórica = \rho \times g \times H \times Q$$

En donde:

ρ = Densidad

g = Valor aceleración de la gravedad (9.8 m / s²)

H = Altura del Salto

Q = Caudal

f) Área del álabe

Fórmula:

$$A = \frac{3}{8} \times \pi \times R^2$$

En donde:

π = 3.1416

R = Radio del diente

g) Inercia del álabe

Fórmula:

$$Y_c = 0.4951 \times R$$

En donde:

R = Radio del diente

h) Fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección del plano "X" u horizontal.

Fórmula:

$$F_x = \rho \times g \times P_x \times A \times \text{sen}(\theta)$$

En donde:

ρ = Densidad

g = Valor aceleración de la gravedad (9.8 m / s²)

P_x = Paso

A = Área del alabe

α = Ángulo de inclinación del tornillo

i) Fuerza que ejerce el agua en dirección del plano "Z" o tangencial.

Fórmula:

$$F_x = \rho \times g \times P_x \times A \times \text{sen}(\theta) \times \tan(\alpha)$$

En donde:

ρ = Densidad

g = Valor aceleración de la gravedad (9.8 m / s²)

P_x = Paso

A = Área del alabe

θ = Ángulo de inclinación del tornillo

α = Ángulo de inclinación del diente

j) Torque

Fórmula:

$$F_x = \rho \times g \times P_x \times A \times \text{sen}(\theta) \times \tan(\alpha) \times Y_c$$

En donde:

ρ = Densidad
 g = Valor aceleración de la gravedad (9.8 m / s²)
 P_x = Paso
 A = Área del alabe
 θ = Ángulo de inclinación del tornillo
 α = Ángulo de inclinación del diente
 Y_c = Inercia del álabe

k) Velocidad angular

Fórmula:

$$\omega = Q \times \tan(x) / A \times Y_c$$

En donde:

Q = Caudal

x = Ángulo de inclinación del diente

A = Área del álabe

Y_c = Inercia del álabe

l) Potencia teórica

Fórmula:

$$Pot = T \times \omega$$

En donde:

T = Torque

ω = Velocidad angular

m) Velocidad lineal

Fórmula:

$$v = \omega \times r$$

En donde:

ω = Velocidad angular

r = Radio

n) Revoluciones

Fórmula:

$$Rpm = v \times 60 / \pi \times d$$

En donde:

v = Velocidad lineal

π = 3.1416

d = diámetro del tornillo sinfín

En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos de los cálculos de diseño del tornillo de Arquímedes para la sección 1+540 del rompeolas del puerto de Ensenada, B.C.

Tabla 3. Resultados para determinar el diseño del tornillo de Arquímedes, sección 1+540

Nombre	Variable		Valor	Unidad
Longitud del eje	L_{eje}	=	23.76	m
Longitud extensor	L_{ext}	=	7.54	m
Salto	H	=	10.5	m
Ángulo de inclinación	θ	=	27	°
Área	A_p	=	58.74	m ²
Volumen	V	=	135.102	m ³
Caudal	Q	=	12.29318	m ³ /s
Densidad del agua	ρ	=	1.025	kg/m ³
Gravedad	g	=	9.81	m/s ²
Numero de hilos	N_h	=	3	
Diámetro exterior de la hélice	θ_3	=	2.28	m
Diámetro del eje de la hélice	θ_2	=	1.14	m
Eficiencia	η	=	0.87	
Ángulo exterior de la hélice	α	=	0.75	°
Longitud de la hélice	L_h	=	10.98	m
Longitud complementaria del eje	Lc	=	1.37	m
Avance	P	=	3.84	m
Paso	P_x	=	1.28	m
Ángulo interior de la hélice	β	=	1.08	°
Área de contacto del agua	A	=	1.53	m²
Centroide	Yc	=	0.56	m
Fuerza de empuje del agua en dirección del plano X	Fx	=	18.9	N
Fuerza tangencial al Tornillo	Fz	=	17.63	N
Torque en todo el Tornillo	T	=	85.37795	Nm
Velocidad angular	ω	=	13.23835	rad/s
Revoluciones por minuto	N	=	126	RPM
Potencia teórica	P_{teo}	=	1130.26	kW
Potencia eje	P_{eje}	=	984.27	kW
Eficiencia del multiplicador	η_m	=	0.97	
Eficiencia del generador	η_g	=	0.9	
Potencia del sistema	Ps	=	986.72	kW

En la siguiente figura se presenta una visualización del acomodo del prototipo propuesto sobre el rompeolas del puerto de Ensenada B.C.



Figura 15. Visualización del acomodo del prototipo propuesto sobre el rompeolas del puerto de Ensenada B.C.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La implementación del tornillo de Arquímedes como motor de baja cota ha sido realizada en países de Europa, principalmente al costado de lechos de ríos, El estudio de este tipo de tecnología y su aplicación en canales representa una inversión a largo plazo en conceptos de ahorro y generación de energía. Para lo cual en el presente estudio se realizó el diseño del prototipo para su posible instalación sobre el rompeolas localizado en el puerto de Ensenada. Debido a que la central de tornillo de Arquímedes puede ser construida con componentes abastecidos por el mercado local, la tecnología de generación a partir de un tornillo de Arquímedes es técnica y económicamente viable en comparación con los demás tipos de sistemas que utilizan la energía undimotriz.

Se recomienda tomar en consideración realizar la investigación a detalle respecto a este mecanismo de generación de energía, así como analizar las opciones respecto a los materiales con los que se puede implementar y verificar su viabilidad para la sostenibilidad de futuras obras de protección portuaria y costera.

Referencias

- Aguilar, J. (2014). Alternativas del aprovechamiento de la energía mecánica de las olas marinas. [Tesis para obtener el grado Académico de Ingeniero Mecánico]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. [Archivo PDF].
- Altamarítima agentes navieros consignatarios. (2023). Los principales puertos marítimos y su conectividad en México. [Consulta en línea]. <https://altamaritima.com.mx/2021/10/18/los-principales-puertos-maritimos-y-su-conectividad-en-mexico/>
- Barrantes, A. (2024). Tornillo de Arquímedes. [Consulta en línea]. https://www.academia.edu/75889190/Tornillo_Arqu%C3%ADmedes
- Clavero, M. y Ortega, C. Fundamentos de Ingeniería Portuaria parte II, (2017). España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Sevilla. [Archivo PDF]. https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/48290/ClaveroGilabert_IngenieriaPortuariaII.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Se%20entiende%20por%20infraestructura%20portuaria,transporte%20y%20el%20intercambio%20modal.
- Enciclopedia Humanidades. (2023). Océano. [Consulta en línea]. <https://humanidades.com/oceanos/#:~:text=Los%20oc%C3%A9anos%20poseen%20una%20profundidad,de%20la%20totalidad%20del%20planeta>
- Espejo, A. (2021). Estado del arte de la tecnología de generación eléctrica oceánica. [Tesis para obtener el grado Académico de Máster Universitario en Ingeniería Industrial]. España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. [Archivo PDF].
- FISHTEK Consulting. (2024). Fish Monitoring and Live Fish Trials, Archimedes Screw Turbine, River Dart [Consulta en línea]. <http://www.mannpower-hydro.co.uk/wp-content/uploads/2016/04/Phase-1-archimedean-screw-fish-passage-test-results.pdf>
- Frías, V. y Moreno, C. (1988). Ingeniería de Costas. Limusa
- Gracia, M. (2014). Estudio de las diferentes formas de conseguir energía con el mar y su aplicabilidad en el litoral español. [Tesis para obtener el grado Académico de Ingeniería Técnica Naval en Propulsión y Servicios del Barco]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. [Archivo PDF]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22261/PFC.pdf>
- Hidrometalica. (2024). Tornillo de Arquímedes. [Consulta en línea]. <https://www.hidrometalica.com/tornillo-arquimedes/>
- Infraestructura Portuaria. (2005). Memorias de obras. [Consulta en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/67614/Infraestructura_portuaria_2005.pdf
- Infraestructura Portuaria. (2007). Memorias de obras. [Consulta en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/67768/Infraestructura_portuaria_2007.pdf
- Infraestructuras civiles y de transporte (2023). Infraestructuras portuarias hacia la energía undimotriz. [Consulta en línea]. <https://eadic.com/blog/entrada/infraestructuras-portuarias-hacia-la-energia-undimotriz/>
- Instituto Catalán de Energía. (2023). Energías del mar. [Consulta en línea]. <https://icaen.gencat.cat/es/energia/renovables/mar/index.html>
- Oppo, D. W. & Curry, W. B. (2012). Deep Atlantic Circulation During the Last Glacial Maximum and Deglaciation. Nature Education Knowledge 3(10):1.
- Santa, J. (2018). Análisis energético de un Tornillo de Arquímedes para canales de regadío con una caída de 2 m y caudal de 2m³/s. [Tesis para obtener el grado Académico de Ingeniero Mecánico]. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. [Archivo PDF]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/13235/SANTA_JOSE_TORNILLO_ARQUIMEDES.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Solarpedia.info, Le enciclopedia sustentable (2024). Energía Undimotriz. [Consulta en línea]. <https://www.solarpedia.info/energia-undimotriz/>
- UTn.BA. Ingeniería Mecánica (2020). Suecia es el primer país en producir comercialmente energía de las olas Fuente: Ecoinventos. [Consulta en línea]. <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/suecia-es-el-primer-pais-en-producir-comercialmente-energia-de-las-olas/>
- UTn.BA. Ingeniería Mecánica (2021). Lo más destacado en energía undimotriz. Fuente: OES Brochure, 30 de marzo de 2021. [Consulta en línea]. <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/lo-mas-destacado-de-la-energia-undimotriz/>
- Wikipedia la enciclopedia libre. (2023). Océano. [Consulta en línea]. <https://es.wikipedia.org/wiki/Oc%C3%A9ano>