



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA EN ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE UN PROTOTIPO A ESCALA QUE APROVECHA LAS CORRIENTES  
MARINAS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA

**PRESENTA:**

ING. SELEF GARCÍA OROZCO

**DIRECTOR DE TESIS:**

DR. EDGAR SANTOYO CASTELAZO

TECNOLÓGICO DE MONTERREY

**CODIRECTOR DE TESIS:**

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO, 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Jurado asignado

<b>Presidente</b>	Dr. Rodolfo Silva Casarín	Instituto de Ingeniería, UNAM
<b>Secretaria</b>	Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez	Facultad de Ingeniería, UNAM
<b>1° Vocal</b>	Dr. Edgar Santoyo Castelazo	Tecnológico de Monterrey
<b>2° Vocal</b>	Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez	Instituto de Energías Renovables, UNAM
<b>3° Vocal</b>	Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin	Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX, 2021

## Agradecimientos

Agradezco a mis padres y hermanos por brindarme siempre su apoyo incondicional, por llenarme de amor y ser la luz de mi camino a cada momento.

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Edgar Santoyo Castelazo por su guía y el seguimiento constante durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a mi codirector de tesis el Dr. Rodolfo Silva Casarín por el apoyo brindado durante mi investigación de maestría y por abrirme las puertas al mundo de la investigación sobre las energías del océano, así como también agradezco al CEMIE-Océano que me brindó el apoyo y patrocinio para culminar esta investigación.

Agradezco al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, por abrirme las puertas de su grupo de investigación en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y por creer en mí. Infinitas gracias.

Agradezco al Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez y a la Mtra. Mirna Guevara García, ambos del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, por el préstamo y soporte brindado del software GaBi.

Agradezco a la Mtra. Esther Ofilia Mandujano García por el apoyo brindado en la realización de un análisis bibliométrico de las energías del océano, el cual nos abrió un panorama amplio sobre el tema. Asimismo, agradezco profundamente el entusiasmo y el conocimiento compartido. Mi admiración total para ti, Esther.

Agradezco a la Dra. Stephanie Ordoñez Sánchez de la Universidad de Strathclyde por el aporte de datos para realizar esta investigación y por ser una inspiración como investigadora mexicana que cumple sus sueños. Estoy agradecida con la vida por conocerte.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo y patrocinio  
brindado durante los dos años de maestría.

Para mis abuelos.

Ustedes vieron en comienzo de este logro desde el inicio junto a mí, hoy lo ven culminar  
desde el cielo.

Los amo con todo el corazón.

# Contenido

Jurado asignado.....	2
Agradecimientos.....	3
Lista de ilustraciones .....	8
Lista de tablas .....	9
Abreviaturas .....	10
Resumen.....	12
I. Introducción .....	13
II. Justificación .....	16
III. Objetivo general .....	16
IV. Objetivos particulares.....	17
Capítulo 1. Energías del océano y panorama energético internacional y mexicano.....	18
1.1 Clasificación de las energías del océano.....	18
1.2 La energía.....	23
1.3 Panorama internacional de la energía.....	23
1.4 Generación de energía eléctrica con fuentes renovables en el mundo y en México .....	26
1.5 Capacidad instalada de tecnologías renovables en el mundo y en México .....	30
1.6 Energías del océano en México .....	34
Capítulo 2. Análisis de Ciclo de Vida .....	35
2.1 Antecedentes .....	35
2.2 Análisis de Ciclo de Vida: definición y metodología.....	37
2.2.1 Definición de Análisis de Ciclo de Vida.....	37
2.2.2 Normas ISO relativas al Análisis de Ciclo de Vida .....	38
2.2.3 Términos y definiciones .....	38
2.2.4 Fases del Análisis de ciclo de vida .....	41
2.2.5 Beneficios de un ACV .....	43
Capítulo 3. Caso de estudio .....	44
3.1 Metodología de evaluación ambiental con enfoque “de la cuna a la puerta” .....	44
3.2 Objetivo y alcance del caso de estudio.....	46
3.2.1 Objetivo.....	46
3.2.2 Alcance.....	46
3.2.3 Unidad funcional.....	47
3.2.4 Tiempo de vida.....	47

3.3	Análisis de Ciclo de Vida de prototipos de generación eléctrica: estado del arte .....	48
3.4	Descripción del sistema de generación eléctrica.....	52
3.4.1	Contexto general de la turbina hidrocínética de eje horizontal.....	52
3.4.2	Parámetros de diseño de la turbina del caso de estudio .....	53
3.4.3	Subsistemas del sistema de generación eléctrica .....	54
Capítulo 4. Análisis de Ciclo de Vida del caso de estudio.....		56
4.1	Análisis de Ciclo de vida del Sistema de Generación Eléctrica de 0.6 kW. ....	56
4.2	Inventario y normalización .....	56
4.3	Metodología CML 2001.....	60
Capítulo 5. Resultados y discusión.....		61
5.1	Resultados por categoría.....	61
5.1.1	Potencial de Acidificación .....	61
5.1.2	Potencial de Eutrofización .....	62
5.1.3	Potencial de agotamiento de la capa de ozono .....	62
5.1.4	Potencial de agotamiento de elementos abióticos.....	63
5.1.5	Agotamiento de recursos abióticos fósiles .....	64
5.1.6	Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce.....	64
5.1.7	Potencial de toxicidad humana.....	65
5.1.8	Potencial de ecotoxicidad acuática marina .....	66
5.1.9	Potencial de calentamiento global.....	66
5.1.10	Potencial de formación de ozono fotoquímico.....	67
5.1.11	Potencial de ecotoxicidad Terrestre .....	68
5.2	Análisis FODA de prototipos de tecnologías del océano .....	70
V. Conclusiones.....		73
VI. Futuras líneas de investigación.....		75
VII. Referencias.....		76
VIII. Anexo.....		79



## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Proyecto MeyGen fase 1. ....	22
Ilustración 2. Suministro de energía primaria a nivel mundial de 1990-2017 en ktoe. ....	24
Ilustración 3. Energía eléctrica generada por fuente a nivel mundial de 1990-2017. ....	25
Ilustración 4. Generación eléctrica por fuente renovable a nivel mundial de 1990-2017. ....	28
Ilustración 5. Energía eléctrica producida con energías renovables en México de 1990-2018. ....	29
Ilustración 6. Capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en el mundo en 2020. ...	31
Ilustración 7. Capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en México en 2020. ....	33
Ilustración 8. Modelo de ciclo de vida. ....	37
Ilustración 9. Fases del análisis de ciclo de vida de acuerdo con la norma ISO 14040. ....	42
Ilustración 10. Metodología de evaluación ambiental de prototipos de generación eléctrica. ....	44
Ilustración 11. Emisiones de CO <sub>2</sub> equivalente en unidad de gramos por prototipo de energías del océano. ....	51
Ilustración 12. Modelo 3D de la turbina hidrocínética DyLoTTA en vista explosiva. ....	54
Ilustración 13. Subsistemas que conforman el sistema de generación eléctrica de 0.6 kW. ....	55
Ilustración 14. Ciclo de vida del Sistema de Generación Eléctrica de 0.6 kW. ....	56
Ilustración 15. Potencial de acidificación en kg de SO <sub>2</sub> equivalente. ....	61
Ilustración 16. Potencial de eutrofización en kg de fosfato equivalente. ....	62
Ilustración 17. Potencial de agotamiento de la capa ozono en kg de R <sub>11</sub> equivalente. ....	63
Ilustración 18. Potencial de agotamiento de elementos abióticos en kg de Sb equivalente. ....	63
Ilustración 19. Potencial de agotamiento de elementos abióticos fósiles en MJ. ....	64
Ilustración 20. Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce en kg de DCB equivalente. ....	65
Ilustración 21. Potencial de ecotoxicidad humana en kg de DCB equivalente. ....	65
Ilustración 22. Emisiones Potencial de ecotoxicidad acuática marina en kg de DCB equivalente. ....	66
Ilustración 23. Potencial de calentamiento global en kg de CO <sub>2</sub> equivalente. ....	67
Ilustración 24. Potencial de formación de ozono fotoquímico en kg de Etileno equivalente. ....	68
Ilustración 25. Potencial de ecotoxicidad terrestre en kg de DCB equivalente. ....	69

## Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de las energías del océano.....	21
Tabla 2. Valores de suministro de energía primaria a nivel mundial en 2017. ....	25
Tabla 3. Valores de generación de energía eléctrica por fuente a nivel mundial en 2017. ....	26
Tabla 4. Valores de generación eléctrica por fuente a nivel mundial en 2017. ....	28
Tabla 5. Valores de generación de energía eléctrica con energías renovables en México en 2018. .	29
Tabla 6. Valores de capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en el mundo en 2020. .....	32
Tabla 7. Valores de capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en México en 2020. .....	33
Tabla 8. Estudios de LCA: una revisión general.....	50
Tabla 9. Parámetros de diseño de la turbina del caso de estudio. ....	53
Tabla 10. Lista de materiales de los subsistemas del prototipo de generación eléctrica DyLoTTA. ..	58
Tabla 11. Parámetros empleados para cálculo de $E_G$ .....	59

## Abreviaturas

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
BM	Banco Mundial
CEMIE	Centros Mexicanos de Innovación en Energía
CNR-INM	The Consiglio Nazionale delle Ricerche Institute of Marine Engineering
DCB	1,4-diclorobenceno equivalente
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida
EPA	Environmental Protection Agency
FODA	Fortalezas Oportunidades Debilidades y Amenazas
HATT	Horizontal Axis Tidal Turbine
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
IEA	International Energy Agency
IFREMER	The Institut Francais de Recherche pour l'exploitation de la mer
IRENA	International Organization for Standardization
ISO	International Organization for Standardization

KHL	The Kelvin Hydrodynamic Laboratory
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
MRI	Midwest Research Institute
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OES	Ocean Energy Systems
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
PV	Photovoltaic
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
UN	United Nations

## Resumen

Esta investigación tiene como objeto realizar una evaluación ambiental de un prototipo a escala laboratorio que aprovecha las corrientes marinas y genera 0.6 kW. La evaluación ambiental toma como referencia la norma ISO 14040 y 14044:2006 con el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Inicialmente se presenta un panorama general de las energías del océano, una perspectiva energética a nivel nacional y mundial sobre el aprovechamiento de estas y posteriormente se aborda la metodología de ACV que se seguirá en esta investigación. Asimismo, se presenta la metodología de investigación; la información correspondiente al caso de estudio que compete esta evaluación ambiental, se realiza el análisis de inventario y modelado del prototipo de estudio para determinar los puntos clave a mejorar.

Finalmente, se analizan los resultados de la investigación y se realiza un análisis FODA que se aplica a todas las evaluaciones ambientales de tecnologías del océano.

## I. Introducción

En la búsqueda de un desarrollo sostenible a nivel mundial, el 25 de septiembre de 2015 la Asamblea General de las Naciones Unidas adopta la *Agenda 2030* (UN, 2015a), la cual se constituye por 17 objetivos y 169 metas de carácter integrado e indivisible que buscan erradicar las problemáticas más urgentes a las que la sociedad hoy en día se enfrenta: pobreza extrema, desigualdad, hambre, falta de acceso al agua y la energía, educación, crecimiento económico sostenible y la crisis climática. Con este acontecimiento histórico, las 193 naciones miembro de las Naciones Unidas se comprometieron al cumplimiento de estos objetivos, promoviendo la paz y el acceso a la justicia.

Actualmente, cada país está llevando a cabo el cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a través de sus propias estrategias, esto gracias a la soberanía que les permite priorizar las acciones inmediatas para erradicar los principales problemas que enfrentan sus pobladores.

México participó activamente en la definición de la Agenda 2030, siendo uno de los países más activos en foros de consulta, participando y liderando el proceso de negociación. Presentó propuestas puntuales para incorporar los principios de igualdad, inclusión social y económica, e impulsó que la sustentabilidad y los derechos humanos fueran ejes rectores de la Agenda 2030. Asimismo, abogó por la adopción de un enfoque multidimensional de la pobreza que, además de considerar el ingreso de las personas, tomara en cuenta su acceso a otros derechos básicos como la alimentación, educación, salud, seguridad social y servicios básicos de vivienda (México, 2016).

México, reafirmando su compromiso y responsabilidad global, constituyó la *Estrategia Nacional para la Puesta en Marcha de la Agenda 2030*, la cual establece el panorama actual del país en cuanto a los objetivos de desarrollo sostenible y, los instrumentos y estrategias necesarios para el cumplimiento de cada objetivo y meta (Gobierno de la Republica, 2018).

Uno de los 17 objetivos de desarrollo sostenible, el cual se enfoca a la energía sostenible es el objetivo 7, el cual habla sobre garantizar el acceso a una energía asequible, fiable,

sostenible y moderna para todas y todos. El objetivo 7 se convierte entonces en un punto clave para la investigación y desarrollo tecnológico del país.

De acuerdo con el contexto que presenta la Estrategia Nacional para la Puesta en Marcha de la Agenda 2030, la cobertura de suministro de energía eléctrica en el país fue del 98.6% en el año 2017 (Gobierno de la Republica, 2018). Con esto, 31.5 millones de viviendas contaron con acceso a la energía eléctrica y más de 233 mil viviendas en comunidades rurales no tuvieron acceso a este servicio.

Por otro lado, de acuerdo con la SEDESOL, 5 millones de familias mexicanas recurren al consumo de biomasa tradicional como la leña y el carbón para cubrir su demanda energética en actividades del hogar como cocinar (Gobierno de la Republica, 2018).

La falta de energía eléctrica en los hogares ralentiza el desarrollo integral de los habitantes, deteriorando la calidad de vida de niñas, niños y mujeres, quienes son los más vulnerables.

Generar energía eléctrica a través de fuentes renovables y limpias es entonces una de las prioridades a nivel nacional e internacional que permitirá garantizar el desarrollo humano, económico y social de todos los seres humanos.

El sector eléctrico nacional ha diversificado la canasta energética en la generación de energía eléctrica en los últimos años, dando paso a las energías limpias. En el año 2017, el 21.1% de la energía eléctrica generada provino de energías limpias (Gobierno de la Republica, 2018), lo cual marcó un importante avance para el cumplimiento de los compromisos internacionales. Asimismo, se logró una capacidad instalada de fuentes limpias del 29.5% respecto a la capacidad total instalada (Gobierno de la Republica, 2018).

Las energías renovables con mayor avance y crecimiento a nivel nacional han sido las energías eólica y solar. Sin embargo, México enfrenta grandes retos en la diversificación de la matriz energética para incursionar plenamente en la generación distribuida y energía de alto impacto.

México, a través de *la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más limpios* (SENER, 2020), estableció las metas de generación de energías limpias del 35.1% para el año 2024; 39.9% para el año 2033 y del 50% de la generación eléctrica total para el año 2050.

De esta forma, la diversificación energética ayudará de manera importante en la generación de energía eléctrica de forma limpia y sostenible, garantizando un mayor número de viviendas y familias que tengan el acceso a la energía eléctrica de forma confiable y asequible, mejorando así su calidad de vida.



## II. Justificación

El análisis de ciclo de vida ha sido parte fundamental en la evaluación ambiental de productos y servicios siguiendo la norma ISO 14040:2006 y dentro de la evaluación de sistemas de generación eléctrica con fuentes renovables ha sido una línea de investigación que ha cobrado auge en las últimas décadas. En la esfera académica y de desarrollo tecnológico, la realización de estudios de análisis de ciclo de vida presenta múltiples ventajas, entre las principales se encuentran aquellas que se alinean al diseño mecánico con perspectiva sostenible. En este sentido, elaborar un análisis de ciclo de vida de prototipos de generación eléctrica en etapas tempranas de desarrollo significa la cuantificación de impactos ambientales en tiempos de toma de decisiones para garantizar que dichas tecnologías impactan al medioambiente de forma mínima respecto a otros prototipos de generación eléctrica.

## III. Objetivo general

Realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) de un prototipo a escala de turbina hidroeléctrica de eje horizontal (Horizontal Axis Tidal Turbine, HATT en inglés) que genera 0.6 kW aprovechando las corrientes marinas para cuantificar los impactos ambientales que conlleva su manufactura y operación. El prototipo HATT llamado DyLoTTA ha sido previamente probado en las instalaciones: *the Consiglio Nazionale delle Ricerche Institute of Marine Engineering (CNR-INM)*, *the Institut Francais de Recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER)* y *the Kelvin Hydrodynamic Laboratory (KHL)* por lo cual, esta investigación cuenta con la información necesaria para realizar un análisis de ciclo de vida con un enfoque “de la cuna a la puerta” (“a cradle-to-gate approach” en inglés) para cuantificar los impactos ambientales del prototipo.

#### IV. Objetivos particulares

- a) Presentar el estado del arte de las energías del océano como alternativa para la generación de energía eléctrica, tipos de energías del océano y tecnologías de aprovechamiento.
- b) Establecer el panorama energético internacional y nacional.
- c) Documentar la participación de las energías del océano en la generación de energía eléctrica a nivel mundial y nacional.
- d) Presentar el estado del arte del análisis de ciclo de vida, así como la metodología que establece la norma ISO 14040.
- e) Realizar una revisión bibliográfica de análisis de ciclo de vida hechos a prototipos que aprovechen las energías del océano.
- f) Recopilar datos que conforman el inventario del prototipo para realizar el ACV mediante el uso de software especializado.
- g) Realizar el ACV del caso de estudio considerando la manufactura y operación en Reino Unido.
- h) Determinar las etapas del ciclo de vida que produzcan mayores externalidades y realizar una matriz de análisis FODA que se implemente en el análisis de ciclo de vida de tecnologías del océano.

# Capítulo 1. Energías del océano y panorama energético internacional y mexicano

Los mares y océanos conforman uno de los recursos renovables altamente aprovechables que tiene la Tierra. Son responsables de mover sistemas que permiten al planeta ser habitable. Asimismo, actúan como reguladores naturales de la temperatura, química, corrientes y la vida que existe en los ecosistemas. Los océanos absorben alrededor del 30% del dióxido de carbono producido por los humanos, amortiguando los impactos del calentamiento global (UN, 2015b).

De acuerdo con las Naciones Unidas, los océanos cubren tres cuartas partes de la superficie de la Tierra, contienen el 97% del agua del planeta y representan el 99% de la superficie habitable del planeta en volumen (UN, 2015b).

Las energías del océano actualmente representan una pequeña porción en la generación de energía eléctrica con energías renovables a nivel mundial. La mayoría de los prototipos aún se encuentran en la fase de demostración. Sin embargo, es importante señalar que el potencial energético que ofrecen los océanos es sumamente alto.

## 1.1 Clasificación de las energías del océano

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (International Renewable Energy Agency, IRENA), aun cuando las tecnologías del océano se encuentren en la etapa de investigación y desarrollo, las tecnologías prometedoras se pueden clasificar en 4 categorías, las cuales son (IRENA, 2017):

- 1. Energía de las olas:** La cual, mediante convertidores capturan la energía contenida en las olas del océano y es utilizada para generar electricidad. Los convertidores pueden ser de columna oscilante, convertidores oscilantes y convertidores que aprovechan la diferencia de alturas.

2. **Energía de las mareas:** Producida ya sea por tecnologías de rango de marea que utilizan barreras (una presa u otra barrera) para almacenar energía entre la marea alta y baja; tecnologías de corrientes marinas con turbinas sumergidas o aplicaciones de sistemas híbridos.
3. **Energía por gradiente salino:** Este tipo de energía surge a partir de diferentes concentraciones de sal, como ocurre cuando un río desemboca en un océano. Los prototipos utilizan tecnologías de ósmosis por presión retardada y electrodiálisis inversa.
4. **Conversión de energía térmica oceánica OTEC:** La cual genera energía a partir de la diferencia de temperatura entre el agua de mar superficial caliente y el agua de mar fría a una profundidad de 800 a 1000 metros.

Por su parte, el Programa de Colaboración Tecnológica de Sistemas de Energías del Océano (*The Ocean Energy Systems Technology Collaboration Programme, OES*), que es una colaboración intergubernamental entre países que operan bajo el marco de referencia establecido por la Agencia Internacional de Energía en París en 2001, tiene su propia clasificación sobre los 4 tipos de energía del océano los cuales son (OES, 2019):

1. **Olas:** Energía cinética y potencial que se asocia a las olas del océano, dicha energía puede ser aprovechada empleando tecnologías modulares.
2. **Mareas y Corrientes:** Se refiere a la energía derivada por los cambios en la altura del nivel del mar o el movimiento de los volúmenes de aguas oceánicas.
3. **Energía Térmica del Océano:** Es la energía solar que se absorbe por los océanos, causando así temperaturas cálidas en la superficie y más frías a mayor profundidad.
4. **Gradiente Salino:** Es la energía generada cuando agua dulce se mezcla con agua de mar.

En México, el Centro Mexicano de Innovación en Energía CEMIE-Océano estableció en su *Carta de Necesidades de Innovación y Desarrollo Tecnológico* una clasificación de 5 tipos de energías del océano (De la Fuente Melo, 2017): 1. *Energía de corrientes marinas*; 2. *Energía proveniente de gradientes salinos*; 3. *Energía proveniente de gradientes térmicos*; 4. *Energía proveniente de las mareas (mareomotriz)* y 5. *Energía de oleaje*.

Asimismo, en el contexto nacional, el *Mapa de Ruta Tecnológica en Energía del Océano*, presenta las generalidades de este tipo de energía, la cual está constituida principalmente por la energía cinética y potencial presente en la dinámica de las masas oceánicas y se clasifica de acuerdo con el tipo de fenómeno asociado (SENER, 2018). De esta forma, la energía del océano se clasifica en el contexto mexicano en los siguientes tipos:

1. **Energía de corrientes marinas:** Permite la producción de electricidad a partir de energía cinética asociada a las corrientes oceánicas.
2. **Energía undimotriz (oleaje):** Permite la producción de electricidad a partir del movimiento de la superficie del océano, en este caso se aprovecha la energía cinética y/o potencial del oleaje.
3. **Energía mareomotriz:** Permite la producción de electricidad a partir de la energía cinética y/o potencial asociado a las mareas, particularmente las astronómicas.
4. **Energía por gradiente térmico:** Permite la producción de electricidad a partir del gradiente que existe entre la temperatura superficial y el fondo en aguas profundas en el océano, dicho gradiente acciona una máquina de calor.
5. **Energía por gradiente salino:** Permite la producción de electricidad a partir del cambio abrupto de densidades asociadas a las variaciones de salinidad entre aguas.

A continuación, la Tabla 1 presenta a modo de resumen las clasificaciones de las energías del océano por cada organismo a nivel internacional y nacional.

<b>Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Energía de las olas</li> <li>2. Energía de las mareas</li> <li>3. Energía por gradiente salino</li> <li>4. Conversión de energía térmica oceánica (OTEC)</li> </ol>
<b>The Ocean Energy Systems Technology Collaboration Programme (OES)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mareas y Corrientes</li> <li>2. Energía térmica del océano</li> <li>3. Gradiente salino</li> <li>4. Olas</li> </ol>
<b>Cemie-Océano</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Energía de las Corrientes marinas</li> <li>2. Energía undimotriz</li> <li>3. Energía mareomotriz</li> <li>4. Energía por gradiente térmico</li> <li>5. Energía por gradiente salino</li> </ol>

*Tabla 1. Clasificación de las energías del océano.*

Aun cuando existe una clasificación distinta de las energías del océano aprovechables en el panorama internacional y el nacional, la brecha entre cada una es corta. Es imperativo establecer a nivel internacional una clasificación universal que permita clarificar el panorama actual y futuro de las energías del océano y las tecnologías de aprovechamiento, para que de esta forma se homogenicen las líneas de investigación y desarrollo a nivel internacional.

El estado del arte de la energía del océano muestra que los retos tecnológicos que se asocian a la captura eficiente de las corrientes, olas y mareas son muy altos debido a las condiciones meteorológicas a las que se llegan a enfrentar. Asimismo, los impactos asociados al aprovechamiento de las energías del océano abarcan distintas esferas como: el impacto a la vida marina, las actividades económicas e industriales como la pesca, el transporte marítimo y las actividades turísticas, por mencionar algunas.

Uno de los prototipos más grandes en la fase de operación es el proyecto MeyGen, el cual consta de un arreglo de 4 turbinas que aprovecha la energía de las mareas marinas. Esta planta de generación eléctrica se encuentra en Escocia y su capacidad instalada actualmente es de 6 MW (SIMEC ATLANTIS ENERGY, 2018).

El proyecto MeyGen se encuentra dividido en las fases: 1A, la cual está en operación; la fase 1B, la cual está en construcción; las fases 1C, 2 y 3 que se encuentran en desarrollo. El objetivo es instalar una capacidad de 398 MW (SIMEC ATLANTIS ENERGY, 2018).

La Ilustración 1 presenta el proyecto MeyGen en la fase 1.



*Ilustración 1. Proyecto MeyGen fase 1.*

*Fuente: SIMEC ATLANTIS ENERGY, 2018.*

Para más detalles sobre las tecnologías de aprovechamiento por tipo de energía del océano, ver Anexo.

## 1.2 La energía

De acuerdo con el Banco Mundial (BM), el acceso a la energía es esencial para poner fin a la pobreza. De esta forma, la energía se convierte en el eje central para cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. A nivel mundial, cerca de 1,000 millones de personas viven sin electricidad (Mundial, 2018). Asimismo, 3,000 millones de personas emplean combustibles contaminantes que no sólo generan contaminación en el aire, sino que son responsables de impactar en la salud de las personas.

## 1.3 Panorama internacional de la energía

Con base en las cifras que reporta la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, IEA), el suministro de energía primaria a nivel mundial en el año 2017 fue de 13,970.636 Mtoe. De esta cifra, el 32% correspondió a petróleo, el 27% al carbón y el 22% al gas natural. Con estos porcentajes, se puede reafirmar la alta dependencia hacia los combustibles fósiles que sigue presente hasta nuestros días. Por otro lado, las energías renovables tuvieron la siguiente participación: energía nuclear 5%, energía hidroeléctrica 3%, biocombustibles 10% y otro tipo de energías renovables, como la energía eólica y solar, 2%.

La Ilustración 2 muestra de forma gráfica el comportamiento del suministro de energía a nivel mundial en un período de tiempo que comprende del año 1990 hasta el 2017, cuya tendencia en estos años ha sido el constante incremento de demanda de los combustibles fósiles, mientras que la participación de las energías renovables muestra una lenta, pero incremental, aparición en la canasta de energéticos primarios.

Por otro lado, la Tabla 2 presenta los valores en kilotoneladas de kilo toneladas equivalentes de petróleo (ktoe) de cada fuente de energía primaria hasta el año 2017.

La generación de energía eléctrica a nivel mundial durante el año 2017 fue de 25,710,230 GWh, esto de acuerdo con la base de datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA). Del total de energía eléctrica generada, el 38% se produjo con carbón como combustible, el 23%



correspondió a tecnologías que emplean gas natural, el 16% correspondió a energía hidroeléctrica y el 10% se produjo con energía nuclear.

La presencia de las energías renovables fue mínima: energía eólica con 4%, biocombustibles 2%, solar fotovoltaica 2% y otro tipo de energías renovables el 1%.

En la Ilustración 3 se muestra la gráfica de generación eléctrica por fuente de 1990 al año 2017. Asimismo, se presentan en la Tabla 3 los valores de generación eléctrica del año 2017 por fuente en GWh.

Se destaca el valor de generación por energía de las mareas, el cual fue de 1,044 GWh.

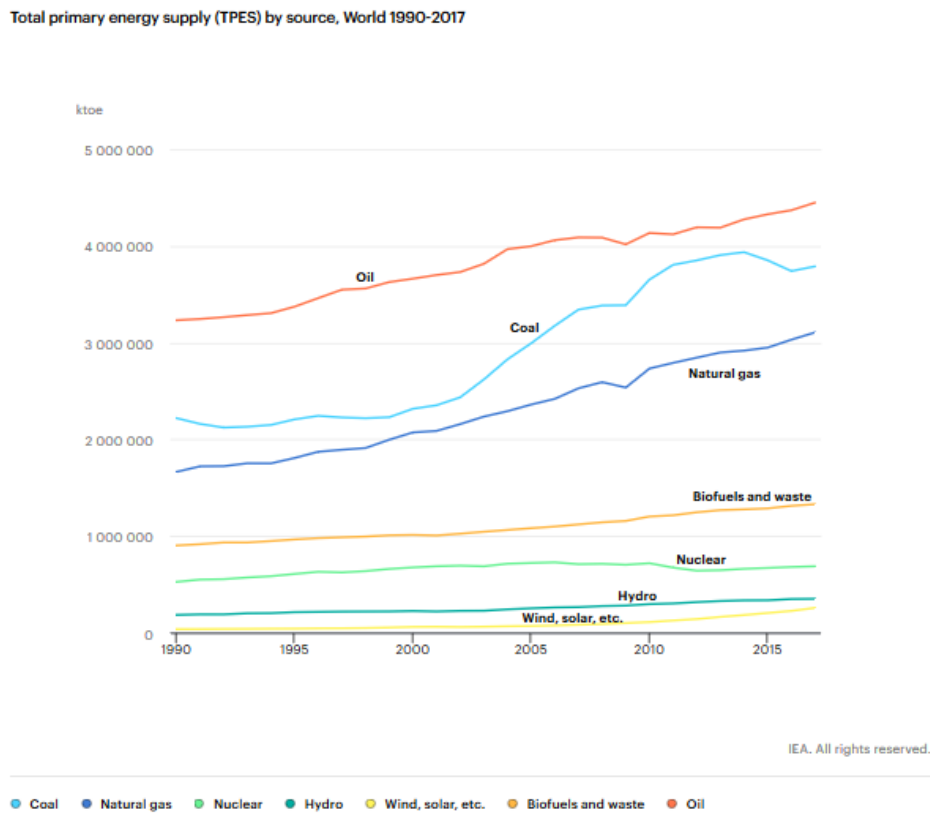


Ilustración 2. Suministro de energía primaria a nivel mundial de 1990-2017 en ktoe.

Fuente: IEA, 2020.

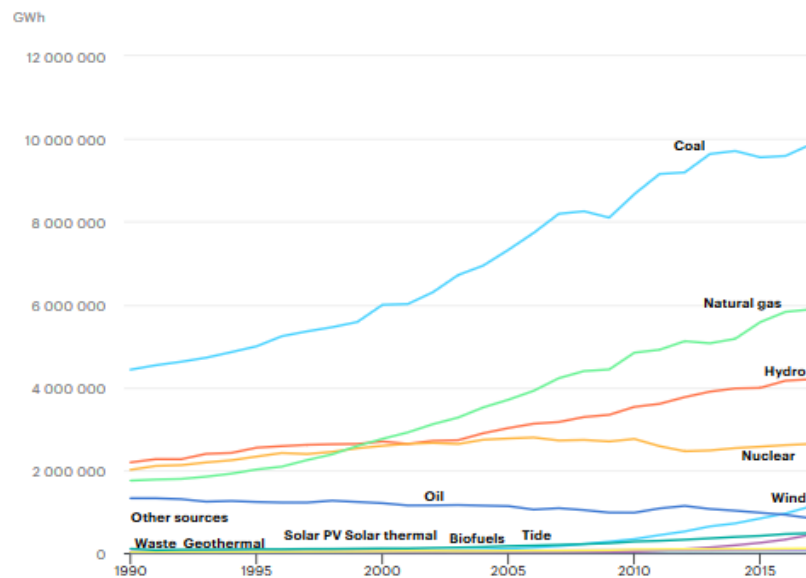
Energía primaria por Fuente en 2017	Unidad [ktoe]
Petróleo	4 449 499

Carbón	3 789 934
Gas natural	3 106 799
Biocombustibles	1 329 064
Nuclear	687 481
Hidroeléctrica	351 029
Eólica, Solar, etc.	256 830

Tabla 2. Valores de suministro de energía primaria a nivel mundial en 2017.

Fuente: IEA, 2020.

Electricity generation by source, World 1990-2017



IEA. All rights reserved.

● Coal ● Oil ● Natural gas ● Biofuels ● Waste ● Nuclear ● Hydro ● Geothermal ● Solar PV  
 ● Solar thermal ● Wind ● Tide ● Other sources

Ilustración 3. Energía eléctrica generada por fuente a nivel mundial de 1990-2017.

Fuente: IEA, 2020.

Generación eléctrica por fuente en 2017	Unidad [GWh]
Carbón	9 863 339

Gas natural	5 882 825
Hidroeléctrica	4 197 299
Nuclear	2 636 030
Eólica	1 127 319
Petróleo	841 878
Biocombustibles	481 529
Solar PV	443 554
Residuos sólidos	114 043
Geotérmica	85 348
Otras	36 022
Mareas	1 044

*Tabla 3. Valores de generación de energía eléctrica por fuente a nivel mundial en 2017.*

*Fuente: IEA, 2020.*

#### **1.4 Generación de energía eléctrica con fuentes renovables en el mundo y en México**

La diversificación de la canasta energética a nivel mundial ha sido amplia en los últimos años. La Ilustración 4 muestra la tendencia de la participación de las energías renovables en la generación eléctrica de 1990 a 2017. Se puede observar la gran presencia de la energía hidroeléctrica y el papel importante que ha tenido en la diversificación de las instalaciones, ya que actualmente se encuentran operando las grandes centrales hidroeléctricas como la presa de las Tres Gargantas en China, la cual es la planta hidroeléctrica más grande del mundo con una capacidad de 22.5 GW, así como también se pueden tener centrales minihidráulicas con generaciones que no superan los 10 MW. Con base en la información disponible de la IEA, se tiene reportada una generación de 4,197,299 GWh con energía hidroeléctrica (Ver Tabla 4), lo cual posiciona a este tipo de energía renovable en el primer lugar a nivel mundial en cuanto a su aprovechamiento.

Por otro lado, observando la tendencia de las energías renovables se puede apreciar la creciente participación de la energía eólica a nivel mundial. Cabe señalar que una de las bondades que tiene este tipo de energía renovable es el potencial que se puede tener en tierra como en los océanos, dando paso a los parques eólicos *offshore*. Con estos avances importantes se ha logrado incrementar la participación de la energía eólica en el mundo.

Las energías del océano han tenido una participación pequeña en la generación de energía eléctrica en los últimos años, ya que en el año 2017 se logró una generación de 1,044 GWh a través del aprovechamiento de las energías de las mareas y olas (Ver Tabla 4). Es importante señalar que los avances en el aprovechamiento de este tipo de energía renovable han sido menores comparados con otro tipo de energías debido a los retos tecnológicos a los que se enfrentan los especialistas.

El caso de México, en cuanto a la generación de energía eléctrica con fuentes renovables, presenta un comportamiento similar al panorama mundial, ya que la presencia de la energía hidroeléctrica hasta nuestros días es muy grande. La Ilustración 5 muestra el comportamiento que ha tenido la participación de las centrales hidroeléctricas en de 1990 a 2017. Como se puede observar, la energía hidroeléctrica ha tenido un comportamiento fluctuante, sin embargo, es la energía con mayor presencia en la matriz energética nacional. Por otro lado, se destaca el crecimiento de la energía eólica en el país, al igual que la energía solar fotovoltaica. La generación eléctrica por fuentes renovables en 2018 presentó 32,526 GWh por energía hidroeléctrica, 13,074 GWh por energía eólica, 5,366 GWh por geotermia y 3,199 GWh con energía solar fotovoltaica (Ver Tabla 5).

Dentro de la generación eléctrica nacional se puede observar que no hay una diversificación mayor en la canasta energética, ya que los prototipos de otras fuentes renovables aún no se encuentran en operación para comercializar energía eléctrica. Es por esta razón que el impulso a las energías renovables como la energía del océano es un punto importante que ayudaría a minimizar la dependencia que hay a combustibles fósiles para generación eléctrica, empleando el gran potencial energético que hay en nuestro país.

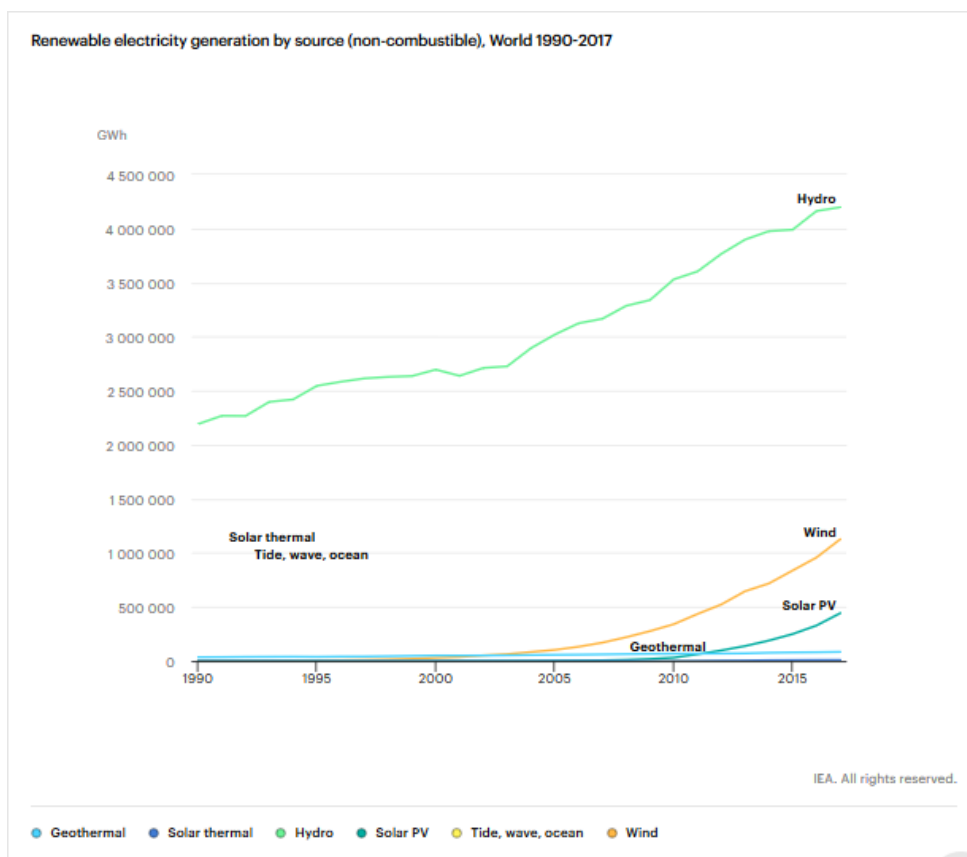


Ilustración 4. Generación eléctrica por fuente renovable a nivel mundial de 1990-2017.

Fuente: IEA, 2020.

Generación eléctrica con energías renovables por fuente	Unidad [GWh]
Hidroeléctrica	4 197 299
Eólica	1 127 319
Solar PV	443 554
Geotérmica	85 348
Solar térmica	10 848
Mareas, olas	1 044

Tabla 4. Valores de generación eléctrica por fuente a nivel mundial en 2017.

Fuente: IEA, 2020.

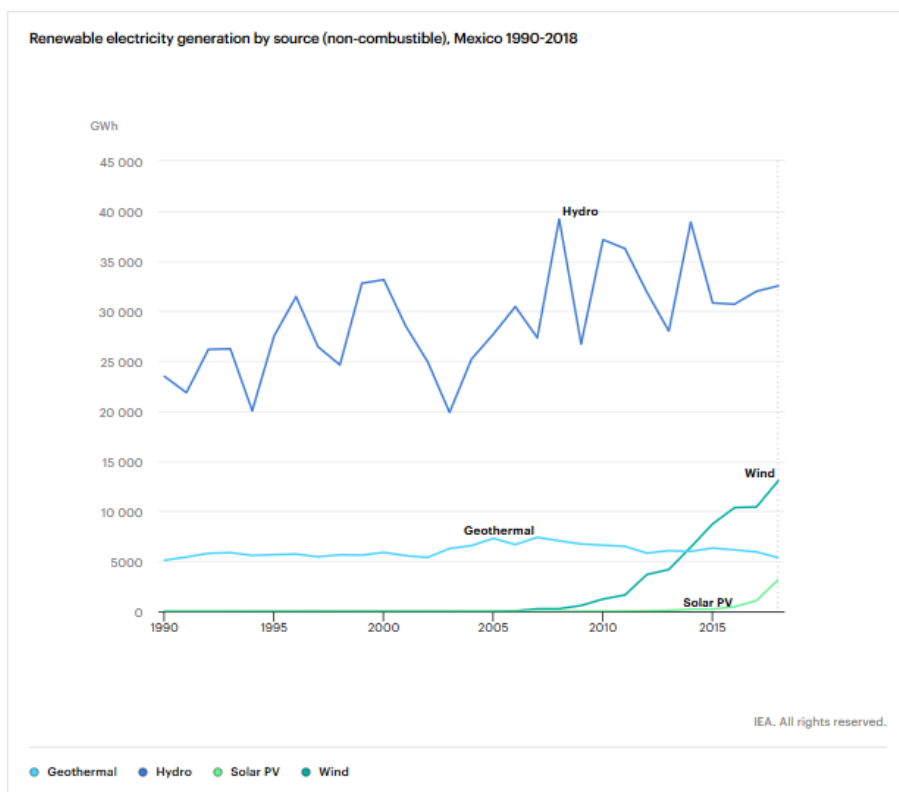


Ilustración 5. Energía eléctrica producida con energías renovables en México de 1990-2018.

Fuente: IEA, 2020.

Generación eléctrica por fuentes renovables en México en 2018	Unidad [GWh]
Hidroeléctrica	32 526
Eólica	13 074
Geotérmica	5 366
Solar PV	3 199

Tabla 5. Valores de generación de energía eléctrica con energías renovables en México en 2018.

Fuente: IEA, 2020.

## 1.5 Capacidad instalada de tecnologías renovables en el mundo y en México

De acuerdo con la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA) y la información reportada hasta el año 2020, de la capacidad instalada de tecnologías que aprovechan las energías renovables el 41.2% representa la generación de energía eléctrica con energía hidroeléctrica (Ilustración 6).

La segunda energía renovable con mayor capacidad instalada es la energía fotovoltaica, seguida por la eólica con 25.3% y 25.0%, respectivamente. La participación de las energías del océano es extremadamente mínima que no alcanza un valor porcentual representativo. Los valores de la capacidad instalada en MW se muestran en la Tabla 6 para una mejor comparación.

Una forma de comparar el panorama actual de las energías del océano se logra con la capacidad instalada en MW respecto a la energía hidroeléctrica. De esta manera se tiene que la capacidad instalada por energías del océano alcanza los 532.13 MW, mientras que la energía hidroeléctrica reporta 1,126,466.17 MW instalados (IRENA, 2018).

Esto representa una brecha importante que, de ser minimizada, permitirá dar entrada a las energías del océano como una alternativa sumamente importante.

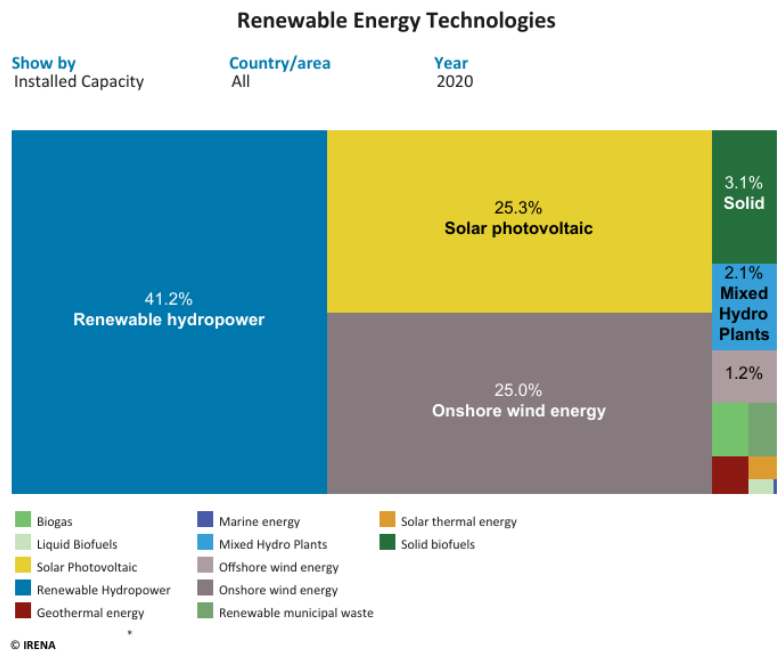


Ilustración 6. Capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en el mundo en 2020.

Fuente: IRENA, 2021.

Energía renovable 2020	Unidad [MW]
Hidroeléctrica	1,153,222.46
Eólica onshore	698,908.87
Solar PV	707,493.77
Biomasa sólida	87,594.30
Plantas mixtas	57,393.12
Eólica offshore	34,367.45
Biogás	20,150.26
Geotermia	14,049.84
Solar térmica	6,474.78
Desechos renovables	15,355.44



Biocombustibles líquidos	3,555.27
Marina	526.84

Tabla 6. Valores de capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en el mundo en 2020.

Fuente: IRENA, 2021.

Por otro lado, la capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en México se muestra en la Ilustración 7, en donde se puede observar que el 44.7% corresponde a tecnologías hidroeléctricas. La capacidad instalada de tecnologías de energía eólica en tierra (*onshore*) representa el 28.7%, mientras que las tecnologías de energía solar fotovoltaica representan el 19.9%. Estas tres energías renovables tienen los valores porcentuales más representativos de la capacidad instalada en México. Para mayor detalle sobre la capacidad instalada reportada por IRENA hasta el año 2020 se presenta la Tabla 7, cuyos valores se encuentran en MW.

Con esta información, se destaca que no se tiene reportada la capacidad instalada de tecnologías del océano en México hasta el año 2020. Esto se debe a que los avances en los prototipos para generación eléctrica en el país se encuentran todavía en fase de pruebas. Sin embargo, esto representa una gran área de oportunidad para el desarrollo tecnológico en el aprovechamiento de este tipo de energía renovable.

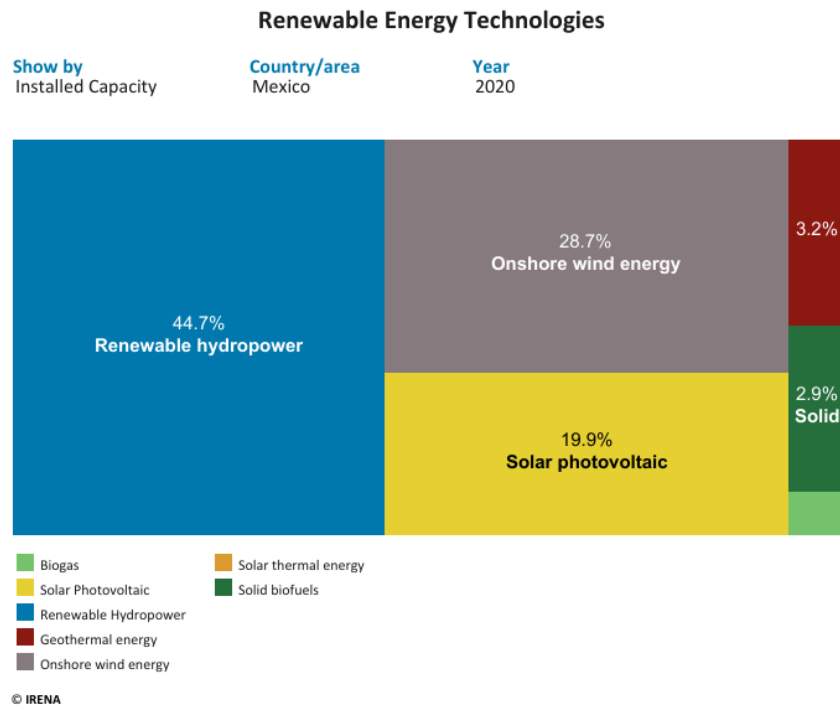


Ilustración 7. Capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en México en 2020.

Fuente: IRENA, 2021.

Energía renovable 2020	Unidad [MW]
Hidroeléctrica	12,670.97
Eólica onshore	8,127.57
Solar PV	5,629.51
Geotermia	905.60
Biomasa sólida	811.48
Biogás	198.51
Solar térmica	14.00

Tabla 7. Valores de capacidad instalada de tecnologías de energías renovables en México en 2020.

Fuente: IRENA, 2021.

## 1.6 Energías del océano en México

En México se tiene la Ley de Aguas Nacionales, la cual de acuerdo con artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, señala que tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control; así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. De igual forma, la Ley de Aguas Nacionales establece los lineamientos necesarios para solicitar concesión para la explotación, uso o aprovechamiento de agua (H. Congreso de la Unión, 2020).

El panorama nacional sobre el aprovechamiento de este tipo de energías establece que se han desarrollado algunos prototipos de prueba en distintos institutos del país, con esto se espera que, en un horizonte de corto plazo, se desarrollen proyectos de generación piloto y comerciales. En mayo de 2012, Comisión Federal de Electricidad licitó un proyecto piloto para generar energía eléctrica a través del aprovechamiento de energía undimotriz, con una capacidad de 3 MW, en Rosarito, Baja California (Cruz Serrano, 2008).

En México se han realizado evaluaciones sobre el potencial que tienen las energías de las olas, corrientes marinas, gradiente térmico y gradiente salino por parte del CEMIE-Océano.

En cuanto a las estrategias nacionales, la hoja de Ruta Tecnológica centra el fortalecimiento de las capacidades tecnológicas, infraestructura, recursos humanos. Así como también se priorizan las acciones para alcanzar las metas fijadas hacia el 2030 (SENER, 2018).

La situación actual a nivel internacional en el campo de las energías del océano resulta ser contrastante respecto a México, ya que países de Europa del Norte se encuentran en etapas avanzadas de desarrollo, instalación y operación (GIS MAPA TOOL, Ver Anexo).

## Capítulo 2. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto (Romero, 2003). El análisis tiene el enfoque conocido como “*desde la cuna hasta la tumba*”.

La Organización Internacional para la Estandarización ISO (por sus siglas en inglés *International Organization for Standardization, ISO*), es el organismo que ha desarrollado una serie de normas enfocadas a la gestión ambiental.

### 2.1 Antecedentes

El primer ACV vida fue realizado en 1969 por el Instituto de Investigación Midwest (*Midwest Research Institute, MRI*) para la empresa Coca Cola, donde la premisa fundamental fue disminuir el consumo de recursos y, por lo tanto, disminuir la cantidad de emisiones al ambiente (Romero, 2003).

A partir de este primer estudio, comenzaron a realizarse nuevas investigaciones. Entre 1970 y 1974, la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency, EPA*) realizó nueve estudios de envases para bebidas (Romero, 2003).

En los años sesenta se realizaron estudios de análisis de ciclo de vida en Gran Bretaña, específicamente un análisis de la energía consumida en el proceso de fabricación de envases de distintos materiales.

Para el año 1980 se desarrollaron cambios importantes para los estudios de análisis de ciclo de vida, uno de ellos fue la metodología para cuantificar el impacto del producto en distintas categorías de problemas ambientales y, el segundo fue, la apertura a todo el público para realizar análisis de ciclo de vida.

En 1993, la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC*), formuló el primer código internacional: *Código de*

*prácticas para el ACV*, con el objetivo de homogeneizar los estudios y seguir una misma metodología. Posteriormente, la ISO apoyó el desarrollo de una estructura uniforme para los métodos, procedimientos y terminologías (Romero, 2003).

Después de treinta años el análisis de ciclo de vida ha tenido un avance impresionante, sin embargo, se reconoce que la técnica está en una etapa temprana de su desarrollo, ya que muchos de los análisis realizados han sido parciales y su principal sector de aplicación ha sido hacia la industria de envasado, seguido de la industria química y de plásticos (Romero, 2003).

Actualmente, se presenta un importante reto, el cual está enfocado a integrar los tres pilares del desarrollo sostenible: *social, económico y ambiental*. De esta forma, se obtendrían los impactos que afectan a las tres esferas. En la literatura se habla del *Análisis de Sustentabilidad de Ciclo de Vida* (en inglés *Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA*), el cual aborda los tres enfoques y busca generar mejores resultados para productos y servicios. Debido a lo reciente y complejo que es este estudio, sigue en estado temprano de investigación y desarrollo.

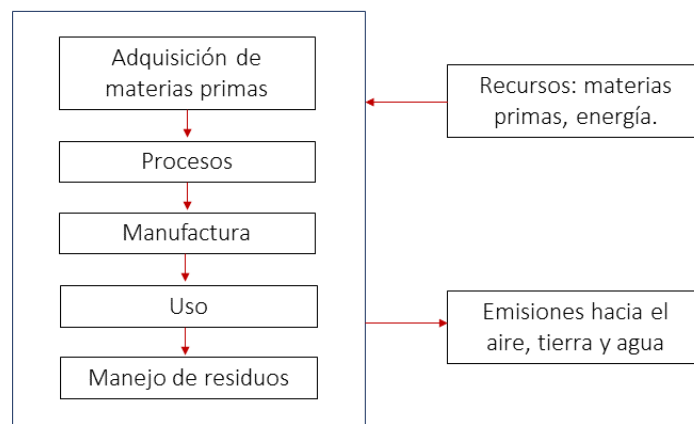
## 2.2 Análisis de Ciclo de Vida: definición y metodología

### 2.2.1 Definición de Análisis de Ciclo de Vida

La norma ISO 14040 define al ACV como: *una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema: evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio.*

Con base en la definición de la norma ISO 14040, el ACV tiene como objetivo medir los impactos ambientales a lo largo de todas las etapas que conforman el ciclo de vida de un producto. El análisis de ciclo de vida considera todas las entradas y salidas de materia y energía asociadas a cada etapa, así como también los desechos y residuos generados.

La Ilustración 8 presenta esquemáticamente el modelo de ciclo de vida de un producto.



*Ilustración 8. Modelo de ciclo de vida.*

*Adaptado de Baumann & Tillman, 2004.*

## 2.2.2 Normas ISO relativas al Análisis de Ciclo de Vida

En la década de 1990, la ISO estandarizó una estructura para el desarrollo de análisis de ciclo de vida, estableciendo las siguientes normas:

- **ISO 14040:** *Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.*
- **ISO 14041:** *Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis del inventario.*
- **ISO 14042:** *Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.*
- **ISO 14043:** *Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Interpretación del Ciclo de Vida.*

Para el año 2006, la ISO realizó modificaciones y revisiones técnicas a las normas establecidas, dando como resultado las siguientes dos normas:

- **ISO 14040:** *Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.*
- **ISO 14044:** *Gestión Medioambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices.*

## 2.2.3 Términos y definiciones

A continuación, se presentan términos y definiciones útiles en el desarrollo de un ACV bajo la metodología establecida por la norma ISO 14040:2006 (ISO, 2006):

### **Análisis del ciclo de vida (ACV).**

Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida.

<b>Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).</b>	Fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas para un sistema del producto a través de su ciclo de vida
<b>Asignación.</b>	Distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.
<b>Ciclo de vida.</b>	Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.
<b>Emisiones y vertidos</b>	Emisiones al aire y vertidos al agua y suelo.
<b>Energía de proceso.</b>	Entrada de energía requerida en un proceso unitario, para llevar a cabo el proceso o hacer funcional el equipo, excluyendo las entradas de energía para la producción y suministro de esta energía.
<b>Entrada.</b>	Flujo de producto, de materia o de energía que entra en un proceso unitario. (Los productos y materiales incluyen materias primas, productos intermedios y co-productos).
<b>Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).</b>	Fase del análisis del ciclo de vida dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de todo el ciclo de vida del producto.
<b>Flujo de energía.</b>	Entrada o salida de un proceso unitario o un sistema del producto expresada en unidades de energía.
<b>Flujo elemental.</b>	Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del medio ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano.



<b>Flujo intermedio.</b>	Flujo de producto, de materia o de energía que ocurre entre procesos unitarios del sistema del producto bajo estudio.
<b>Indicador de categoría de impacto.</b>	Representación cuantificable de una categoría de impacto.
<b>Interpretación del ciclo de vida.</b>	Fase del análisis del ciclo de vida en la que los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, se evalúan en relación con el objetivo y el alcance definidos, para llegar a conclusiones y recomendaciones.
<b>Límite del sistema.</b>	Conjunto de criterios que especifican cuales de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto.
<b>Materia prima.</b>	Materia primaria o secundaria que se utiliza para elaborar un producto.
<b>Proceso unitario.</b>	Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida.
<b>Proceso.</b>	Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.
<b>Producto intermedio.</b>	Salida de un proceso unitario que es entrada de otros procesos unitarios que requiere una transformación adicional dentro del sistema.
<b>Producto.</b>	Cualquier bien o servicio.
<b>Residuo.</b>	Sustancias u objetos a cuya disposición se procede o se está obligado a proceder.

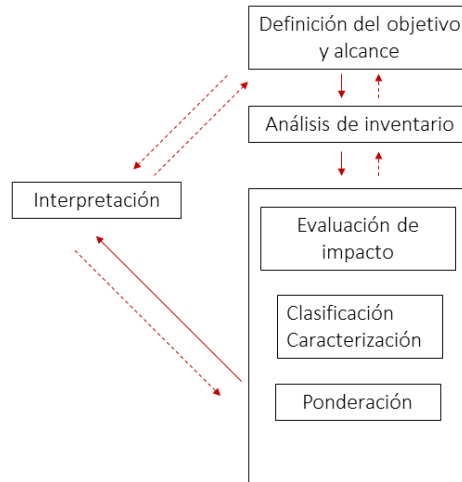
<b>Resultado del análisis del inventario del ciclo de vida.</b>	Resultado de un análisis del inventario del ciclo de vida que clasifica los flujos que atraviesan los límites del sistema y que proporciona el punto de partida para la evaluación del impacto del ciclo de vida.
<b>Salida.</b>	Flujo de producto, de materia o de energía que sale de un proceso unitario.
<b>Sistema del producto.</b>	Conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto.
<b>Unidad funcional.</b>	Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia.

#### 2.2.4 Fases del Análisis de ciclo de vida

Un análisis de ciclo de vida está conformado por cuatro fases principales, las cuales se encuentran definidas por la *ISO 14040: 2006*, las cuales son:

1. Definición de objetivo y alcance.
2. Análisis de inventario.
3. Evaluación del impacto.
4. Interpretación.

De forma gráfica, se muestra la Ilustración 9 que presenta las fases del análisis de ciclo de vida de acuerdo con la norma ISO 14040.



*Ilustración 9. Fases del análisis de ciclo de vida de acuerdo con la norma ISO 14040.*

*Adaptado de Baumann & Tillman, 2004.*

A continuación, se presentan las fases que conforman al ACV:

### **1. Definición de objetivo y alcance.**

De acuerdo con la ISO 14040:2006, el alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular.

### **2. Análisis de inventario.**

La fase del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es la segunda fase del ACV. Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido.

### **3. Evaluación del impacto.**

La fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) es la tercera fase del ACV. El objetivo de la EICV es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental.

#### **4. Interpretación.**

Es la fase final del procedimiento de ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV o del EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

Generalmente el ACV no considera los asuntos económicos o sociales de un producto, pero el enfoque del ciclo de vida y las metodologías descritas en la norma ISO 14040:2006 se pueden aplicar a estos otros aspectos.

##### **2.2.5 Beneficios de un ACV**

De acuerdo con la norma ISO 14040:2006, la realización de un ACV tiene los siguientes beneficios:

- i. Ayuda a identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- ii. Aporta información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales en la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos, entre otras.
- iii. Permite seleccionar los indicadores de desempeño ambiental pertinentes.
- iv. Ayuda al marketing, implementando un esquema de etiquetado ambiental o de una declaración ambiental de producto.

## Capítulo 3. Caso de estudio

### 3.1 Metodología de evaluación ambiental con enfoque “de la cuna a la puerta”

En la Ilustración 10 se presenta la metodología de la evaluación ambiental de prototipos de generación eléctrica propuesta en esta investigación con el enfoque de “la cuna a la puerta”.

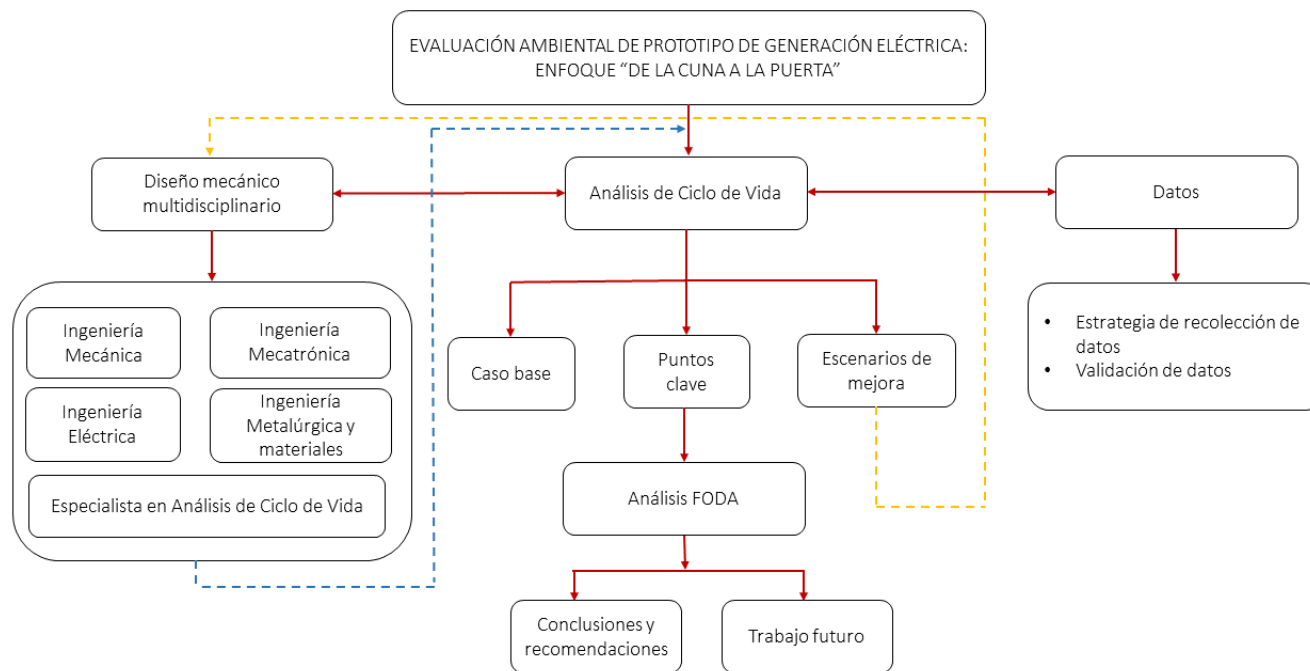


Ilustración 10. Metodología de evaluación ambiental de prototipos de generación eléctrica

La metodología se centra en los prototipos de generación eléctrica que aprovechan las energías del océano. En esta investigación se hace especial énfasis en el empleo del análisis de ciclo de vida en la etapa de diseño e ingeniería básica de un prototipo de generación eléctrica para detectar los puntos clave del escenario base y proponer escenarios de mejora en procesos y uso de materiales para modificarlos y proponer mejoras.

La evaluación ambiental se basa en la norma ISO 14040:2006 y se construye con la recopilación de datos del prototipo de forma directa o a través de bases de datos internacionales. La evaluación ambiental fomenta la comunicación multidisciplinaria entre expertos de ingeniería mecánica, ingeniería mecatrónica, ingeniería eléctrica, ingeniería metalúrgica y materiales, por mencionar algunos.

Esta etapa de comunicación se lleva a cabo en la primera etapa de la evaluación ambiental, ya que esto propicia la construcción del inventario y ciclo de vida del prototipo de generación eléctrica. Durante esta fase se establece el enfoque que se quiere dar al estudio y la unidad funcional que permitirá comparar los resultados obtenidos con otras tecnologías.

En la recolección de datos se recurre principalmente a los grupos de investigación para recopilar datos de masas, materiales y procesos de manufactura que se encuentran relacionados propiamente por el prototipo de generación eléctrica. En este proceso se recurre a bases de datos internacionales que permitan complementar información que no se encuentre cuantificada dentro del proyecto. Este proceso requiere una validación por parte de expertos para dar paso al análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida puede realizarse con una variedad de software; para esta investigación se emplea el software GaBi, el cual es un producto capaz de cuantificar impactos ambientales, costos, generar reportes de sostenibilidad, entre otros más (Thinkstep, 2021).

Una vez realizado el análisis de ciclo de vida con el escenario base, se cuantifican los impactos ambientales y se detectan los puntos clave para proponer escenarios de mejora; retroalimentar al grupo multidisciplinario de diseño y nuevamente realizar el análisis de ciclo

de vida, haciendo de esta evaluación un procedimiento iterativo que permita tomar las mejores decisiones en etapas tempranas de diseño.

Finalmente, un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) se genera a través de toda la evaluación ambiental de prototipos de generación eléctrica que aprovechan las energías del océano. Con este análisis FODA se detectan los puntos clave y que pretenden tener un impacto importante en la esfera ambiental, de gobernanza y grupos de investigación como trabajo futuro.

### **3.2 Objetivo y alcance del caso de estudio**

A continuación, se plantea la definición del objetivo y alcance de este análisis de ciclo de vida con base en la metodología de la norma ISO 14040-14044:2006. Es importante señalar que esta investigación considera la puesta en operación de un prototipo de escala laboratorio por lo cual, el almacenamiento de energía generada, así como cualquier interconexión a un sistema independiente quedan fuera del alcance. Se analizarán los impactos ambientales con base en el inventario de materiales y piezas que conforman los subsistemas del prototipo DyLoTTA.

#### **3.2.1 Objetivo**

Calcular los impactos ambientales de un prototipo a escala de una turbina de eje horizontal capaz de producir 0.6 kW e identificar los puntos críticos (hot spots en inglés) para proponer alternativas de mejora.

#### **3.2.2 Alcance**

El análisis de ciclo de vida se centra en la evaluación ambiental desde la fase de extracción de materiales, procesos de manufactura, transporte y puesta en operación del prototipo de generación eléctrica. Se considera un análisis “de la cuna a la puerta” (“a-cradle-to-gate” en inglés), en el cual el fin de vida útil y la desinstalación del prototipo se encuentran fuera del alcance de este estudio.

Se establece como escenario base la manufactura del prototipo de generación eléctrica hasta la fase de instalación y operación. Es decir, se consideran los materiales de los componentes de los subsistemas para manufacturar el prototipo y dejarlo en condiciones de operación en laboratorio. Esto incluye que las pruebas se realizan en laboratorio sin ambiente salino.

### **3.2.3 Unidad funcional**

La unidad funcional para este caso de estudio se define como 1 kWh.

### **3.2.4 Tiempo de vida**

Se considera un tiempo de vida de 10 años para normalizar el inventario del prototipo de generación eléctrica DyLoTTA. Este parámetro se definió como resultado de una búsqueda bibliográfica de prototipos de generación eléctrica similares en donde el tiempo de vida mínimo es de 5 años para el prototipo *Point Absorber WEC* (Paredes et al., 2019), por lo que se decidió utilizar un período de vida útil 2 veces mayor a éste para evaluar los impactos ambientales con una vida útil más larga.



### 3.3 Análisis de Ciclo de Vida de prototipos de generación eléctrica: estado del arte

En la Tabla 8 se presenta una adaptación de Paredes et. al de una revisión general de los análisis de ciclo de vida que han sido realizados en el período de 2007-2019. Esta tabla presenta el potencial aprovechado por prototipos, unidad funcional, metodología de análisis, país de los grupos de investigación que han realizado estos análisis y finalmente el título del artículo correspondiente a cada investigación.

Tipos de energía	Prototipo	Unidad Funcional	Alcance	Metodología de Análisis	País*	Artículo
Energías del océano en general	WEC / OTEC/ Tidal	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	An overview on greenhouse gas emission characteristics and energy evaluation of ocean energy systems from life cycle assessment and energy accounting studies.
Olas	OBREC WEC	Un módulo	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Italia	Life cycle environmental impact assessment of an overtopping wave energy converter embedded in breakwater systems.
Olas	Pelamis WEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	ReCiPe and CED methods	Reino Unido	An LCA of the Pelamis wave energy converter
Olas	Point absorber WEC	-	De la cuna a la tumba	-	Italia	First Life cycle impact considerations of two wave energy converters.
Olas	Buoy-rope-drum WEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	ReCiPe method	China	Life cycle assessment of a buoy-rope-drum wave energy converter.
Olas	Point absorber WEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Suecia	Life Cycle Assessment of a Wave Energy Converter.
Olas	Pelamis WEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	EDIP LCA method	Reino Unido	Full life cycle assessment of a wave energy converter.

Olas	Point absorber WEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	EDP LCA method	Suecia	Life Cycle Assessment of Electricity from Wave Power
Olas	Wave Dragon WEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	EDIP LCA method	Dinamarca	Life cycle assessment of the wave energy converter: Wave Dragon.
Olas	Pelamis P1	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	Energy and carbon audit of an offshore wave energy converter.
Corrientes marinas	Swansea Bay Tidal Lagoon	1 kWh	De la cuna a la puerta	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	Assessment of Embodied Energy and Carbon Emissions of the Swansea Bay Tidal Lagoon from a Life Cycle Perspective.
Corrientes marinas	Four tidal devices	10 MW	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	Tidal energy machines: A comparative life cycle assessment study.
Corrientes marinas	Deep Green Tidal	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Suecia	Life Cycle Assessment of an Ocean Energy Power Plant: Evaluation and Analysis of the Energy Payback Time with Comparison Between Sweden and Tanzania.
Corrientes marinas	Tidal Severn barrage	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	An energy and carbon life cycle assessment of tidal power case study: The proposed Cardi-Weston severn barrage scheme.
Corrientes marinas	Seagen Marine Current Turbine	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine.
Olas/Corrientes Marinas	Point absorber WEC horizontal axis turbine	1 kWh	De la cuna a la tumba	ILCD	Holanda	Life cycle assessment of ocean energy technologies.

Olas/Corrientes Marinas	Oyster WEC/SeaGen turbine	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Reino Unido	Life Cycle Comparison of a Wave and Tidal Energy Device.
Gradiente térmico	OTEC	1 kWh	De la cuna a la tumba	CO <sub>2</sub> emissions aggregated	Holanda	Life Cycle Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion.
*Investigadores que desarrollaron el ACV.						

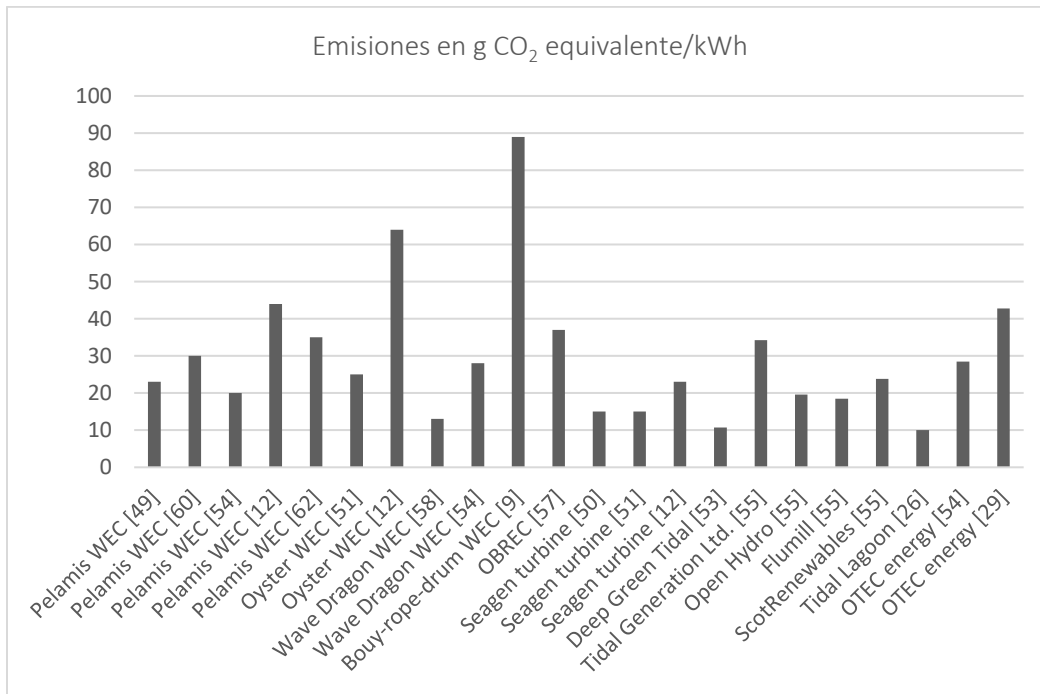
*Tabla 8. Estudios de LCA: una revisión general.*

*Adaptado de Paredes et al., 2019.*

El estado del arte muestra que la realización de evaluaciones ambientales basadas en la metodología de ACV y las normas ISO 14040-14044:2006 ha tenido un auge importante en las últimas dos décadas. Sin embargo, es importante puntualizar que estos prototipos no son de escala laboratorio, lo cual implica que sus impactos ambientales y hot spots cuentan con desventajas a nivel escala real, lo que implica que modificar o rediseñar un elemento para minimizar sus impactos ambientales se traduce en costos elevados.

La importancia de realizar evaluaciones ambientales en prototipos a escala laboratorio yace en los resultados que se pueden obtener en etapas tempranas de desarrollo de proyectos, es decir, la detección oportuna de áreas de mejora en materiales se traduce en mejores resultados para ser aplicados en la escala real del prototipo.

En la Ilustración 11 se muestran las emisiones en gramos de CO<sub>2</sub> equivalente generados por 1 kWh. Asimismo, se puede apreciar que los prototipos fueron evaluados por más de una investigación, cuyos resultados varían de acuerdo con la metodología de análisis de impactos empleada. Para más información, consultar referencias del artículo original de Paredes et. al.



*Ilustración 11. Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en unidad de gramos por prototipo de energías del océano.*

*Adaptado de Paredes et al., 2019, Los números entre corchetes representan a los artículos de investigación del artículo original.*

Los resultados indican que el promedio de emisiones generadas por tecnologías que aprovechan las energías del océano es de 29.05 g de CO<sub>2</sub> equivalente/kWh. Es importante mencionar que la mayoría de los análisis se realizaron contemplando un enfoque “de la cuna hasta la tumba”, tomando en cuenta así la etapa de disposición final de los prototipos, lo cual impactó en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, así como también algunos estudios incluyeron cimentación, sistemas de anclaje y conexión a la red eléctrica (Paredes et al., 2019).

### 3.4 Descripción del sistema de generación eléctrica

El caso de estudio es el resultado de una colaboración internacional cuya realización fue posible con el apoyo del Dr. Rodolfo Silva Casarín, quien estableció la comunicación directa con la Dra. Stephanie Ordoñez Sánchez y la Universidad de Strathclyde.

El modelo de estudio es una turbina de eje horizontal (HATT, Horizontal Axis Tidal Turbine) a escala 1/20 llamada DyLoTTA y cuya generación neta es de 0.6 kW.

#### 3.4.1 Contexto general de la turbina hidrocínética de eje horizontal

Las turbinas hidrocínéticas de eje horizontal operan bajo los mismos principios que las turbinas eólicas, compartiendo además filosofía de diseño (Cardona-Mancilla et al., 2018).

La potencia de una corriente se determina con la siguiente ecuación matemática:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \eta$$

*Ecuación 1. Potencia de una corriente libre en un área limitada.*

Donde:

*P: Potencia mecánica extraída de la turbina.*

*$\rho$ : Densidad del fluido de trabajo.*

*A: Área de la sección transversal barrida por el álabe.*

*V: Velocidad de la corriente.*

*$C_p$ : Coeficiente de potencia.*

*$\eta$ : Eficiencia del tren de transmisión.*

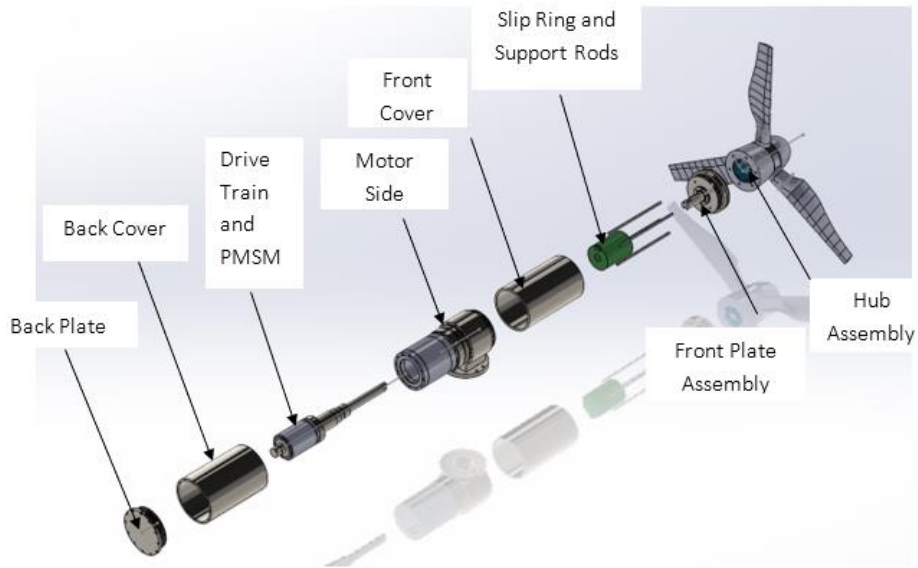
### 3.4.2 Parámetros de diseño de la turbina del caso de estudio

En la Tabla 9 se presentan los parámetros del prototipo DyLoTTA. Algunos de los términos se encuentran en inglés ya que la traducción podría no ser la más apropiada.

Parámetro	Valor
Velocidad nominal del flujo constante	1.3 ms <sup>-1</sup>
Velocidad nominal del flujo instantáneo	1.5 ms <sup>-1</sup>
Potencia de generación neta	0.6 kW
Velocidad Rotacional Máxima	350 RPM
Torque nominal continuo	41 Nm
Torque nominal instantáneo	54 Nm
Empuje del rotor máximo	1.07 kN
Blade Root máximo	Flapwise: 129.76 Nm
Momento de flexión	Edgewise: 18.13 Nm
Sample rate	1032 Hz
Número de Reynolds en el diámetro base a 1.4 ms <sup>-1</sup>	9.62x10 <sup>5</sup>
Área del rotor	0.64 m <sup>2</sup>

*Tabla 9. Parámetros de diseño de la turbina del caso de estudio.*

En la Ilustración 12 se presenta el prototipo DyLoTTA en 3D con los respectivos subsistemas que lo conforman. Por cuestiones de confidencialidad, detalles sobre dimensiones más detalladas no son plasmados en esta investigación. La cuantificación de masas y materiales se realiza en la etapa de análisis de inventario para la evaluación ambiental.

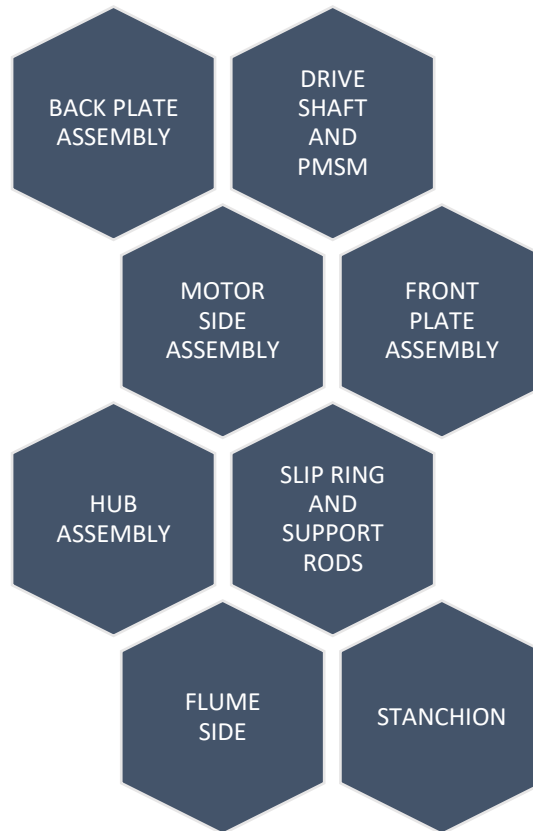


*Ilustración 12. Modelo 3D de la turbina hidrocínética DyLoTTA en vista explosiva.*

### 3.4.3 Subsistemas del sistema de generación eléctrica

Para analizar el sistema de generación eléctrica es importante establecer los subsistemas que lo conforman para analizarse apropiadamente y cuantificar en cada subsistema los materiales necesarios para su construcción.

En la Ilustración 13 se presentan los subsistemas que conforman al caso de estudio. En esta definición de subsistemas se trabaja con los nombres en inglés que originalmente fueron nombrados por los autores y diseñadores del modelo DyLoTTA para evitar errores de traducción.



*Ilustración 13. Subsistemas que conforman el sistema de generación eléctrica de 0.6 kW.*

Una vez establecidos los subsistemas que conforman el sistema de generación eléctrica, se procederá a realizar el inventario de los componentes de cada uno y los materiales necesarios que implican su construcción. Se considera que la energía eléctrica, térmica y transporte que son requeridos en la manufactura y modelado de procesos corresponden al escenario energético de Reino Unido, lugar en donde se manufacturó el prototipo.



## Capítulo 4. Análisis de Ciclo de Vida del caso de estudio

En este capítulo se presenta el desarrollo completo del análisis de ciclo de vida del caso de estudio.

### 4.1 Análisis de Ciclo de vida del Sistema de Generación Eléctrica de 0.6 kW.

El ACV de la turbina DyLoTTA considera la etapa de manufactura y ensamble, operación y mantenimiento (Ver Ilustración 14). Se reitera que el almacenamiento de energía eléctrica e interconexión a un sistema eléctrico quedan fuera del alcance de esta investigación.

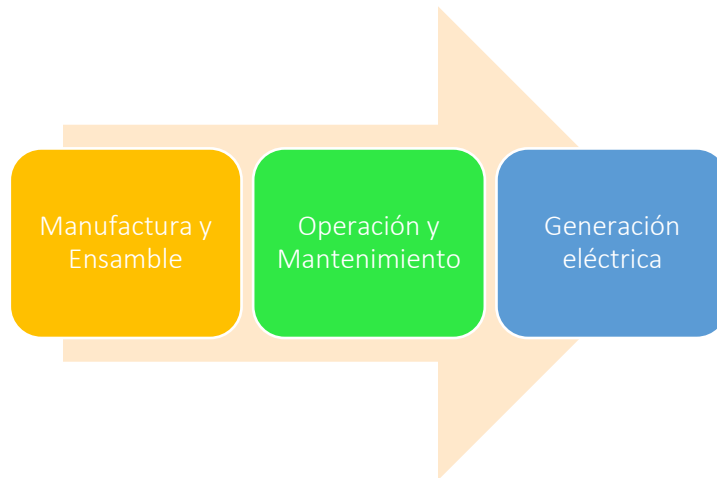


Ilustración 14. Ciclo de vida del Sistema de Generación Eléctrica de 0.6 kW.

### 4.2 Inventario y normalización

El inventario se llevó a cabo por subsistemas tomando como base los nombres originales del prototipo DyLoTTA. Las masas de los elementos, así como también las especificaciones más técnicas son omitas por confidencialidad del proyecto.

BACK PLATE ASSEMBLY
End plate 130E.
SKF NJ 2206 ECP single row cylindrical roller bearing with polyamide cage.
M5 Plain stainless-steel screw.
M5 Plain copper washers.
4mm Bore nitrile 70 rubber O-Rings.
DRIVE SHAFT AND PMSM
Back drive shaft.
MRT 130E PMSM.

M5 Plain stainless-steel screw.
External circlip.
<b>MOTOR SIDE ASSEMBLY</b>
Mid Plate 130E.
Back cover.
SKF 6008.
MST130E PMSM rotor.
ECN113 encoder.
M5 Plain stainless-steel screw.
M10 stainless-steel bolt.
M4 stainless-steel bolt.
Stainless-steel internal circlip.
4mm Bore nitrile 70 rubber O-Rings.
5mm Bore nitrile 70 rubber O-Rings.
M5 Plain stainless-steel screw.
<b>FRONT PLATE ASSEMBLY</b>
Front plate.
Front cover.
Thrust load plate.
Front drive shaft.
SKF rubber sealed thin section deep groove ball bearing .
SKF hardened stainless speed sleeve for shafts.
SKF double lip nitrile rubber rotary.
Bearing spacer front plate.
Stainless-steel external circlip.
4mm Bore nitrile 70 rubber O-Rings.
M5 Plain stainless-steel screw.
M5 Plain stainless-steel slot screw.
M5 Plain copper sealing washers.
Lemo JGG.2B.318.SLAD42.
<b>HUB ASSEMBLY</b>
Blade load measurement hub.
Thrust torque transducer sleeve.
Thrust torque transducer.
ICA4H load cell amplifier.
Nose cone.
Strain gauges.
Lapp kabel.
Mounting PCB.
Lemo JGG.2B.318.SLAD42.
Lemo JGG.1B.308.SLAD42.

Lemo EPG.1B.SLL Socket.
M8 hex head screw.
Hex socket button stainless-steel plain socket screw.
2.4mm Bore nitrile 70 rubber O-Rings.
3mm Bore nitrile70 rubber O-Rings.
4mm Bore nitrile 70 rubber O-Rings.
Support rods.
Moflon.
Bright zinc plated, clear passivated steel head machine screws.
<b>FLUME SIDE</b>
IndraDrive inverter single axis.
IndraDrive control unit advanced single axis.
IndraDrive firmware.
Firmware option COE.
IndraDrive accessories SD Card.
IndraDrive accessories mounting.
IndraDrive accessories shield connection.
Cable, readymade.
Cable, readymade.
Power cable, readymade.
Electrical connection.
Indradrive power supply.
Power line filter.
Choke.
IndraDrive accessories mounting.
Encoder cable readymade.
Electric connection.
NI 9203 Current measurement module.
<b>STANCHION</b>
Lemo FVG.2W.326
Lemo PVG.2W.326
Lemo FVG.3W.318
Lemo PVG.3W.318
Lemo FVG.5W.310
Lemo PVG.5W.310
3M 3750/26 Multipair screened cable

*Tabla 10. Lista de materiales de los subsistemas del prototipo de generación eléctrica DyLoTTA.*

El procedimiento de normalización está relacionado con el factor de escala que se define a continuación (Rojas Hernández, 2016):

$$fe = E_G^{-1}$$

*Ecuación 2. Factor de escala para normalizar el inventario.*

Donde:

$fe$ : Factor de escala

$E_G$ : Generación eléctrica producida durante el período de tiempo establecido

La generación eléctrica producida se calcula con el tiempo de vida útil del prototipo, el cual es de 10 años para el prototipo DyLoTTA.

$$E_G = C_p * P * (10 \text{ años})$$

*Ecuación 3. Generación eléctrica de la turbina durante 10 años.*

Donde:

$E_G$ : Generación eléctrica producida durante el período de tiempo establecido

$C_p$ : Coeficiente de potencia

$P$ : Potencia neta de la turbina

Los datos empleados para el cálculo de la generación eléctrica de la turbina DyLoTTA en 10 años se muestran en la Tabla 11, así como también el factor de escala resultante para normalizar el inventario.

Factor de potencia	0.3	[1]
Generación al año	1576.8	[kWh]
Tiempo de vida	10	[años]
Generación eléctrica en 10 años	15768	[kWh]
Factor de escala	6.34196E-05	[kWh] <sup>-1</sup>

*Tabla 11. Parámetros empleados para cálculo de  $E_G$ .*

### 4.3 Metodología CML 2001

La metodología CML fue desarrollada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leidene, de Países Bajos. Es la metodología más utilizada para cuantificar impactos ambientales.

Esta metodología vincula los flujos de elementos de la base de datos Ecoinvent con los flujos de las sustancias de los factores de caracterización. Las categorías de impacto de la metodología CML 2001 son las siguientes (Carabaño et al., 2014):

- Potencial de agotamiento de los recursos materiales no renovables o agotamiento de recursos abióticos (AA), expresado en kg de Sb.
- Potencial de acidificación de recursos hídricos y del suelo (A), expresado en kg de SO<sub>2</sub> equivalente.
- Potencial de eutrofización (Eu), expresado en kg de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equivalente.
- Potencial de calentamiento global (CG), expresado en kg de CO<sub>2</sub> equivalente.
- Potencial de agotamiento del ozono estratosférico (AO), expresado en kg de R<sub>11</sub> equivalente.
- Potencial de formación de ozono fotoquímico (OF), expresado en kg de etano equivalente.
- Toxicidad humana (TH), expresado en kg de 1,4-diclorobenceno (DCB) equivalente.
- Ecotoxicidad de agua dulce (EAD), expresado en kg de 1,4-diclorobenceno (DCB) equivalente.
- Ecotoxicidad acuática marina (EAM), expresado en kg de 1,4-diclorobenceno (DCB) equivalente.

En el análisis de ciclo de vida desarrollado en esta investigación se toma como base de datos de consulta Ecoinvent v.3.1 y la metodología de análisis de impactos ambientales CML 2001. El software empleado para llevar a cabo el ACV es el software GaBi.

## Capítulo 5. Resultados y discusión

Una vez realizado el análisis de ciclo de vida con la herramienta computacional GaBi se presentan a continuación los resultados obtenidos.

### 5.1 Resultados por categoría

Los resultados obtenidos mediante el software GaBi se presentan por categoría de acuerdo con la metodología CML 2001.

#### 5.1.1 Potencial de Acidificación

El Potencial de acidificación total obtenido corresponde a  $1.608 \times 10^{-4}$  kg de  $\text{SO}_2$  equivalente, en la cual  $1.569 \times 10^{-4}$  corresponde a la etapa de manufactura y el resto a la operación y mantenimiento. En la etapa de manufactura se detectó que el subsistema Front Plate Assembly presentaba los resultados más altos con elementos como Front Cover, cuya emisión de AP es de  $0.358 \times 10^{-4}$  kg  $\text{SO}_2$  equivalente. Esto se relaciona directamente con el material de aleación de acero cromado 18/8 y los procesos de manufactura empleados. Por otro lado, el elemento Front Plate fue el elemento con menor emisión de  $\text{SO}_2$  equivalente, con una cuantificación de  $0.155 \times 10^{-4}$  kg (Ver Ilustración 15).

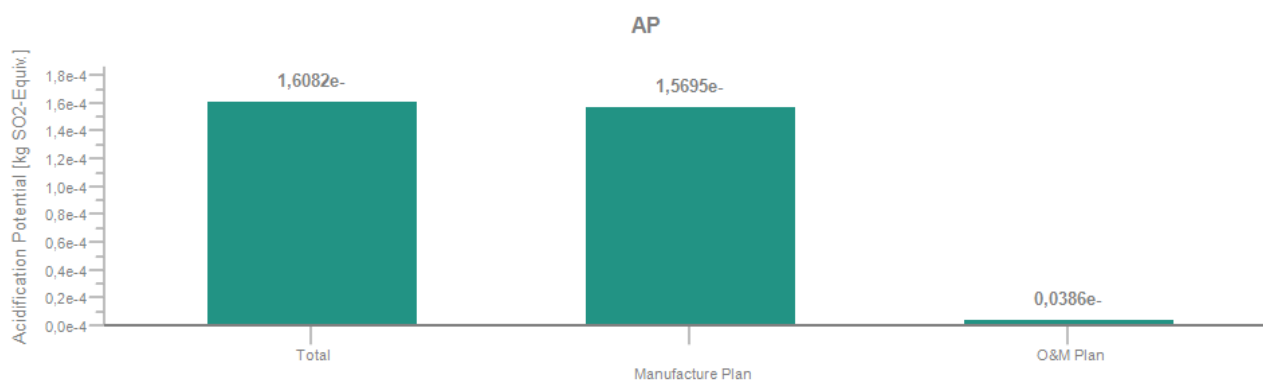


Ilustración 15. Potencial de acidificación en kg de  $\text{SO}_2$  equivalente.

### 5.1.2 Potencial de Eutrofización

El potencial de eutrofización, el cual corresponde al enriquecimiento de nutrientes en sistemas acuáticos, presenta resultados importantes que se concentran en los procesos de manufactura, con  $5.189\text{E-}5$  kg de fosfato equivalente y  $0.108\text{E-}5$  kg en operación y mantenimiento (Ver Ilustración 16).

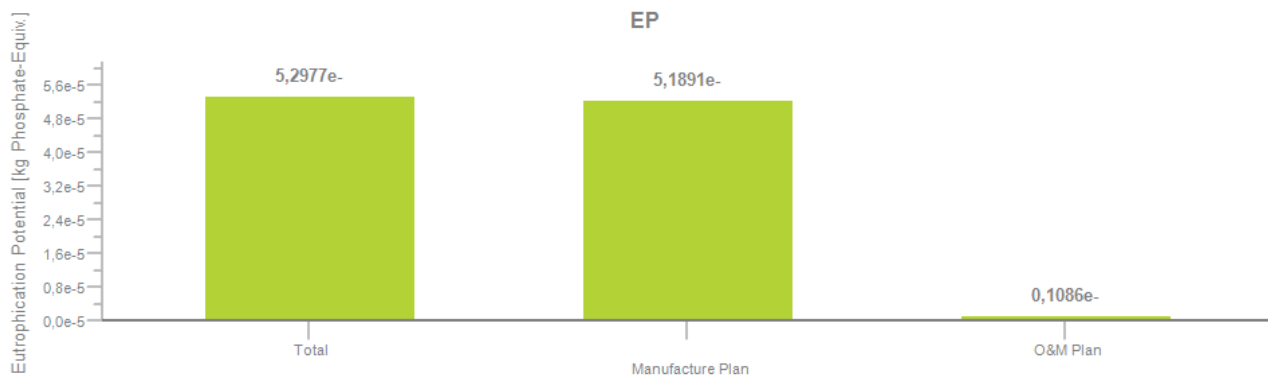


Ilustración 16. Potencial de eutrofización en kg de fosfato equivalente.

### 5.1.3 Potencial de agotamiento de la capa de ozono

El potencial de agotamiento de la capa de ozono se refiere a la cantidad de destrucción del ozono estratosférico causado por una sustancia. Se pone como parámetro de medición el refrigerante fluorado R11. Los resultados del ACV indican que  $1.471\text{E-}9$  kg corresponden a la etapa de manufactura y que  $0.346\text{E-}9$  kg son producidos en la etapa de operación y mantenimiento. Estos resultados son muy bajos, lo cual no representa un factor alarmante de emisión. Sin embargo, se pone especial interés en la etapa de manufactura, la cual nuevamente muestra que las mayores emisiones se producen en esta fase (Ver Ilustración 17).

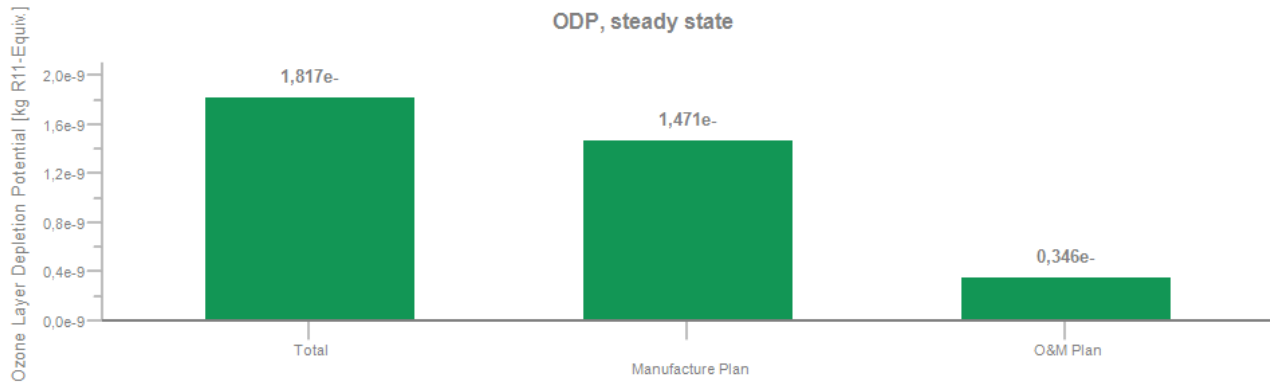


Ilustración 17. Potencial de agotamiento de la capa ozono en kg de R<sub>11</sub> equivalente.

#### 5.1.4 Potencial de agotamiento de elementos abióticos

Para el caso de potencial de agotamiento de elementos abióticos se tiene como medida el kg de Sb equivalente. Los elementos abióticos hacen referencia a los recursos naturales, elementos y minerales disponibles en el medio ambiente. Los resultados de este ACV muestran que en la etapa de manufactura se emitieron 6.450E-7 kg Sb equivalente, mientras que en la operación y mantenimiento sólo se produjeron 0.021E-7 kg (Ver Ilustración 18).

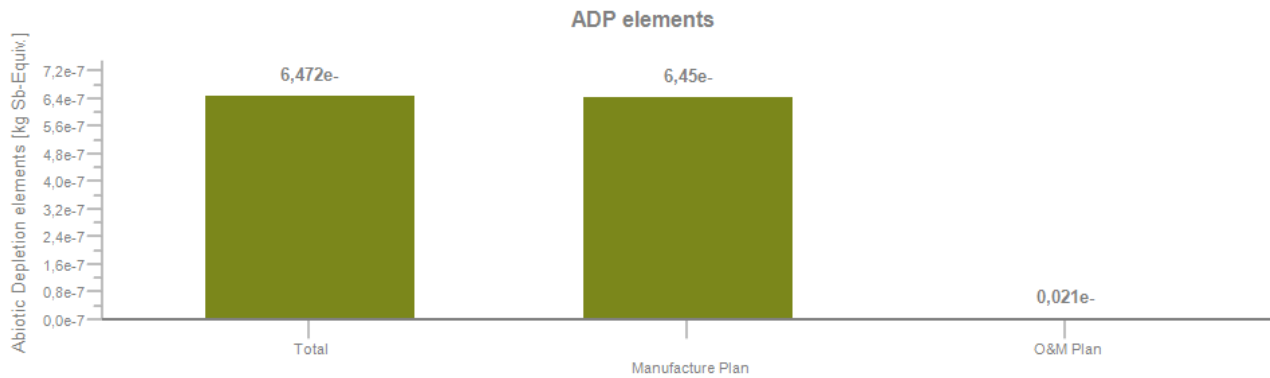


Ilustración 18. Potencial de agotamiento de elementos abióticos en kg de Sb equivalente.



### 5.1.5 Agotamiento de recursos abióticos fósiles

En el caso del agotamiento de recursos abióticos fósiles se utiliza como unidad de medida el MJ. Los resultados muestran que la etapa de manufactura registra un consumo de 0.253 MJ, mientras que la operación y mantenimiento tan sólo 0.028 MJ en el período de vida útil de 10 años (Ver Ilustración 19).

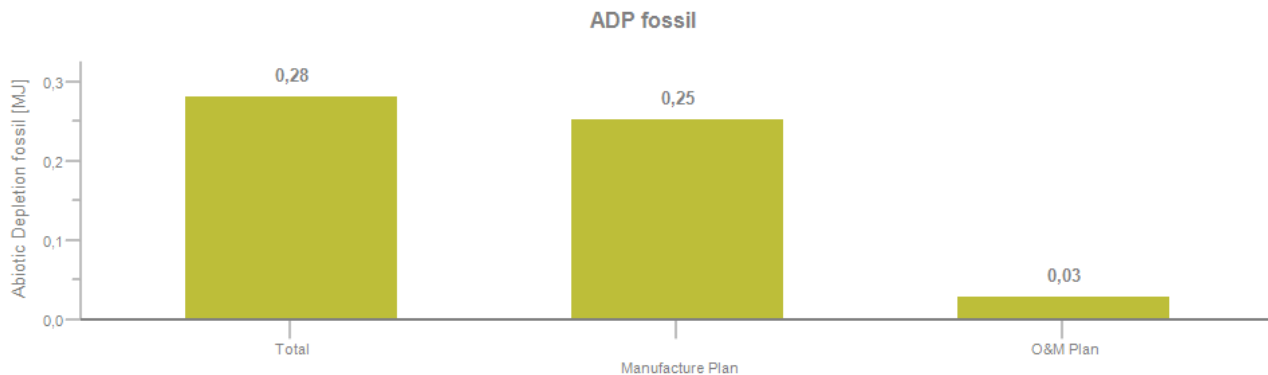


Ilustración 19. Potencial de agotamiento de elementos abióticos fósiles en MJ.

### 5.1.6 Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce

Los impactos tóxicos que afectan al agua dulce son el resultado de mecanismos provocados por la liberación de sustancias con un efecto directo sobre la salud del ecosistema. Se miden en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente (Mediavilla Briones, 2019). En el caso de estudio, estos impactos se cuantifican 0.058 kg DCB equivalente para la etapa de manufactura y  $9.376 \times 10^{-5}$  kg DCB equivalente para la operación y mantenimiento (Ver Ilustración 20).

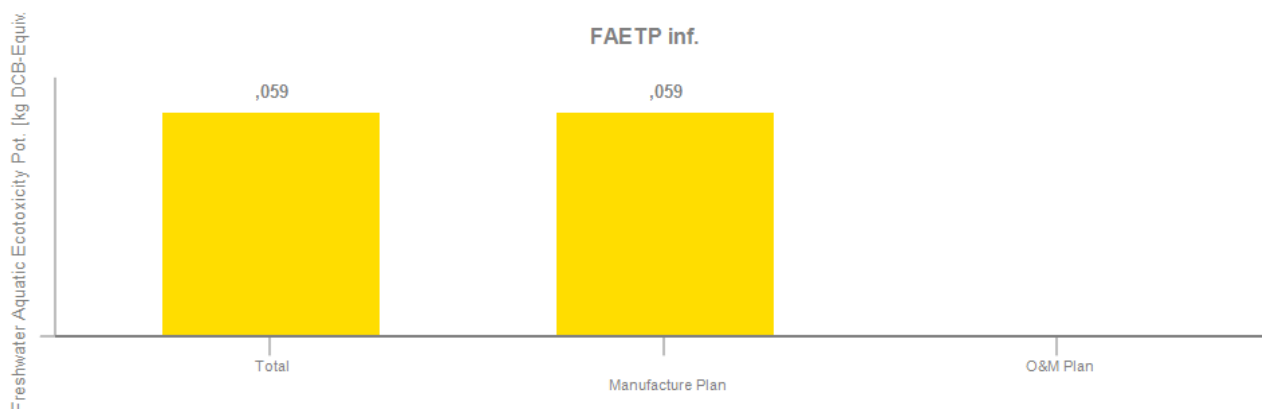


Ilustración 20. Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce en kg de DCB equivalente.

### 5.1.7 Potencial de toxicidad humana

Al igual que el potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce, el potencial de toxicidad humana se cuantifica en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente, lo que significa que estas cantidades representan la absorción de tóxicos en el cuerpo humano a través de inhalación, ingesta o a través de la piel (Mediavilla Briones, 2019). Estos efectos están relacionados con el cáncer. Los resultados indican que la etapa de manufactura genera 0.313 kg DCB equivalente por otro lado, la operación y mantenimiento es responsable de 0.29E-3 kg DCB equivalente. Los resultados (Ver Ilustración 21) muestran impactos menores, sin embargo, es importante tener en cuenta que cualquier modificación en la manufactura puede implicar un menor impacto al ser humano y entre mejores prácticas se lleven a cabo, mejores serán los resultados para una evaluación ambiental.

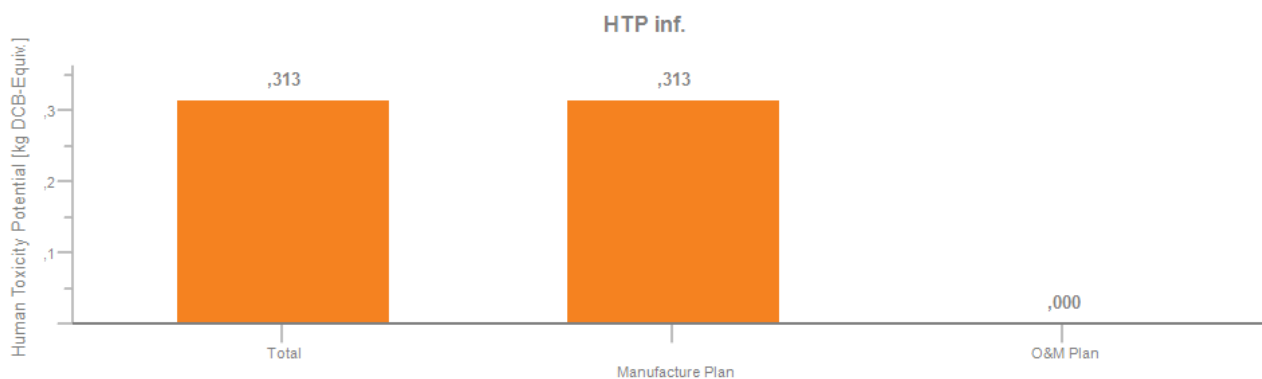


Ilustración 21. Potencial de ecotoxicidad humana en kg de DCB equivalente.

### 5.1.8 Potencial de ecotoxicidad acuática marina

El potencial de ecotoxicidad acuática marina se mide a través de la unidad kg 1,4-diclorobenceno equivalente, el cual indica la cantidad absorbida por la vida marina al estar expuesta a elementos tóxicos en el ecosistema. En la manufactura se cuantifican 81.106 kg DCB equivalente en el proceso de manufactura y 0.364 kg DCB equivalente en la operación y mantenimiento. Estos resultados (Ver Ilustración 22) muestran que los procesos de manufactura impactan de una forma significativa a la vida marina. Asimismo, es importante señalar que cuando un prototipo que aprovecha las energías del océano se instala en sitio es necesario analizar a fondo todo el impacto que hay en el ecosistema producido por recubrimientos anticorrosión, la biocorrosión y la alteración del ecosistema marino. Es imperativo realizar investigaciones profundas que permitan realizar evaluaciones ambientales con bases de datos actualizados.

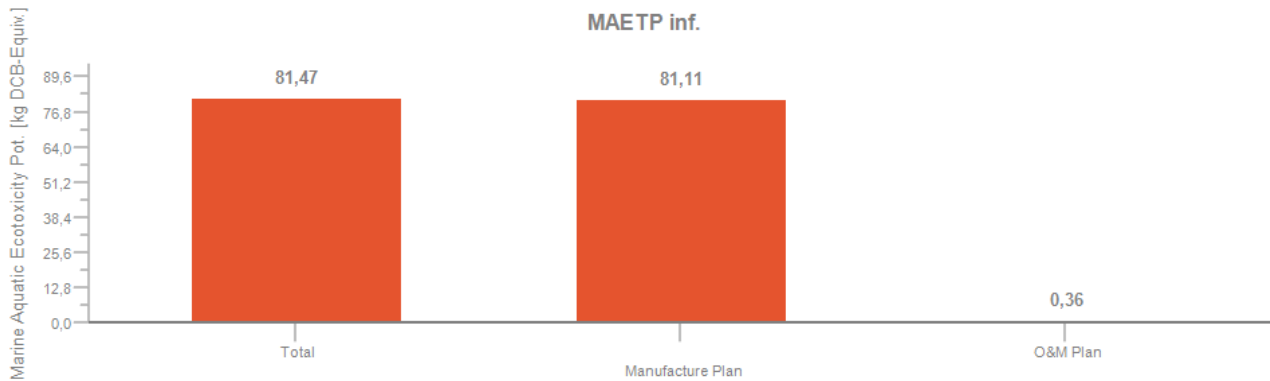


Ilustración 22. Emisiones Potencial de ecotoxicidad acuática marina en kg de DCB equivalente.

### 5.1.9 Potencial de calentamiento global

La categoría de mayor impacto y relevancia es la de potencial de calentamiento global, ya que permite cuantificar en kg de CO<sub>2</sub> equivalente la capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiactivo con un horizonte de tiempo de 100 años (Mediavilla Briones, 2019). Este potencial tiene la capacidad de influir en la temperatura superficial terrestre y parámetros climáticos. Para el ACV del prototipo DyLoTTA se produjeron 0.024 kg

CO<sub>2</sub> equivalente para la etapa de manufactura, de los cuales 0.565E-2 kg CO<sub>2</sub> equivalente corresponden al elemento Front Cover, que está relacionado al proceso de manufactura empleado para su producción y el material, el cual es una aleación de acero y cromo 18/8. El proceso de manufactura es torneado con CNC. En cuanto al empleo de energía eléctrica se tiene como resultado una generación de 0.011E-3 kg CO<sub>2</sub> equivalente, considerando el mix energético de Reino Unido. Aquí se tiene un área de oportunidad importante, ya que, si para la realización de procesos de manufactura la energía eléctrica proviniera de fuentes renovables, los impactos serían menores.

Para la operación y mantenimiento se cuantifican 0.440E-3 kg CO<sub>2</sub> equivalente, los cuales están totalmente ligados a la producción del lubricante que se emplea en el mantenimiento, el cual corresponde a un lubricante en aceite.

Finalmente, se cuantifican en total 25.05 g CO<sub>2</sub> equivalente, lo cual entra dentro del rango del potencial de calentamiento global de los prototipos que aprovechan las energías del océano (Ver Ilustración 23).

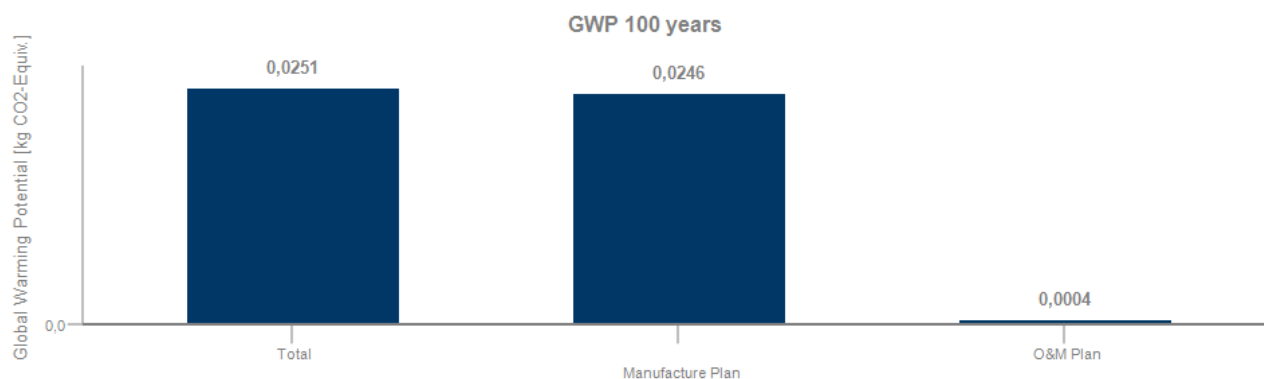


Ilustración 23. Potencial de calentamiento global en kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

### 5.1.10 Potencial de formación de ozono fotoquímico

La formación de ozono fotoquímico bajo la tropósfera debido a la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles y de CO en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar es

nociva para la vegetación, las vías respiratorias, entre otras. Se cuantifican en kg de Etileno equivalente.

La manufactura del prototipo DyLoTTA implica la generación de  $1.629\text{E-}5$  kg Etileno equivalente, mientras que  $0.180\text{E-}5$  kg Etileno equivalente corresponde a la etapa de operación y mantenimiento. Estos resultados (Ver Ilustración 24) muestran puntos favorables para la evaluación ambiental.

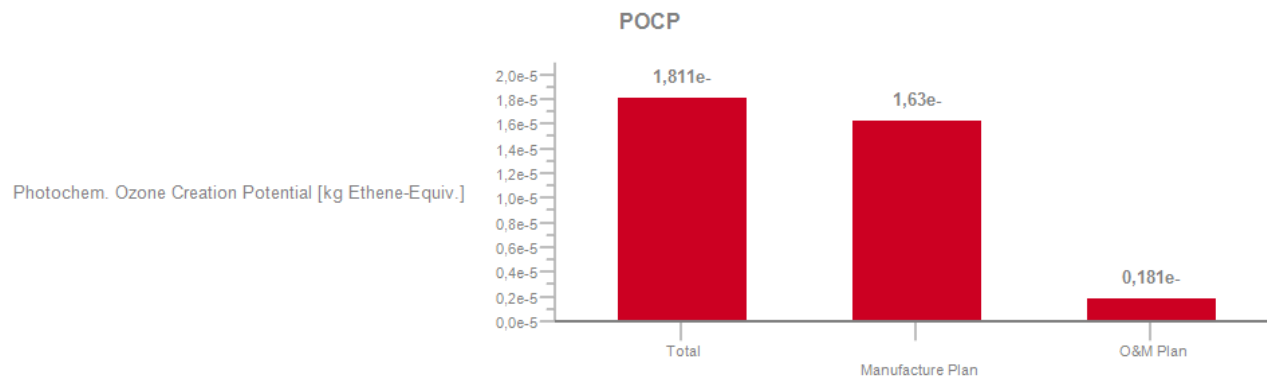


Ilustración 24. Potencial de formación de ozono fotoquímico en kg de Etileno equivalente.

#### 5.1.11 Potencial de ecotoxicidad Terrestre

Para evaluar la ecotoxicidad terrestre se emplea la unidad de medida kg 1,4-diclorobenceno equivalente, el cual cuantifica los efectos nocivos en la tierra. La etapa de manufactura del caso de estudio produce  $0.010$  kg DCB equivalente, mientras que  $3.711\text{E-}6$  kg DCB equivalente corresponden a la Operación y Mantenimiento. Ambos resultados (Ver Ilustración 25) muestran puntos positivos para la evaluación ambiental del prototipo DyLoTTA.

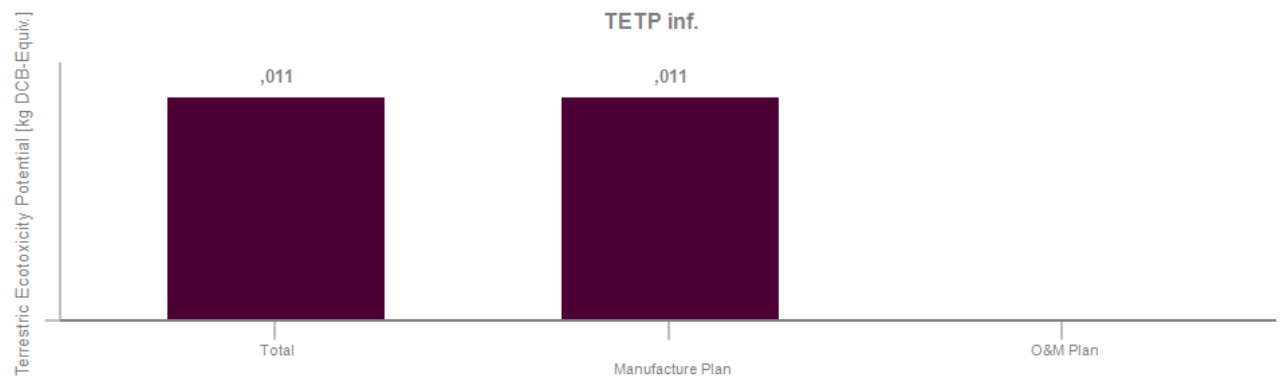


Ilustración 25. Potencial de ecotoxicidad terrestre en kg de DCB equivalente.

## 5.2 Análisis FODA de prototipos de tecnologías del océano

### F O R T A L E Z A S

- La diversificación de la matriz energética promueve la investigación en el campo de tecnologías que aprovechen fuentes renovables tales como la energía del océano.
- El acceso a información para identificar grupos de investigación en el país y en el mundo.
- Financiamiento para el desarrollo de nuevas tecnologías por parte de organismos internacionales.
- El crecimiento de interés en cuanto a las tecnologías que aprovechen recursos del océano.
- El apoyo y desarrollo científico proveniente de otros grupos de investigación que enriquezca el análisis de ciclo de vida para el diseño mecánico.

### O P O R T U N I D A D E S

- Desarrollar un ACV en etapa de ingeniería básica para el rediseño oportuno del prototipo minimizando los impactos hacia el medioambiente.
- Implementar el diseño sostenible en proyectos de desarrollo tecnológico como punto clave en la etapa de ingeniería básica y de diseño.
- Colaborar con grupos de investigación internacionales para generar una sinergia en diferentes campos multidisciplinarios.
- Garantizar el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7, 13 y 14.
- Establecer las bases que sirvan a los tomadores de decisiones replantear cambios en la política y gobernanza en el sector energético.

### D E B I L I D A D E S

- Al ser tecnologías nuevas, el estado de desarrollo está en etapas tempranas y los datos para realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) puede ser escasos.
- Al ser recomendaciones de diseño y no una normativa para todos los prototipos de generación eléctrica, no todas las tecnologías, ya sean renovables o no, podrían no considerar la implementación de estas herramientas en sus etapas de diseño.

### A M E N A Z A S

- El retiro de fondos en etapas de desarrollo o el paro total de un proyecto por razones extraordinarias.
- Falta de incentivos por la parte privada para invertir en tecnologías del océano y que los avances logrados queden en la esfera académica.

El análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) representa un pilar sumamente importante en esta investigación, ya que se convierte en la parte complementaria que justifica la importancia de la realización de una evaluación ambiental de prototipos que aprovechan las energías del océano a tempranas etapas de desarrollo tecnológico.

La metodología de investigación (Ver Ilustración 10) se construyó durante el desarrollo de ésta como un proceso iterativo, en el cual se fueron detectando los puntos clave en el desarrollo de tecnologías del océano y la importancia de su evaluación ambiental.

Una de las principales fortalezas que tienen las tecnologías del océano es que su desarrollo e implementación permite lograr una diversificación en la matriz energética para la generación de electricidad en el mundo y representa un área de oportunidad importante a nivel nacional. Actualmente grupos de investigación a nivel internacional se encuentran en etapas tempranas de desarrollo tecnológico, lo cual permitiría lograr una retroalimentación en términos de diseño sostenible para minimizar impactos ambientales y poder establecer bases de datos de consulta para aquellos investigadores en temas de ACV.

En el análisis FODA se detectan como oportunidades las recomendaciones en áreas relacionadas con el diseño mecánico, selección de materiales y el rediseño que sean de índole multidisciplinario para corroborar con expertos que las modificaciones no comprometan la eficiencia del prototipo de estudio. Esto a su vez se traduce en una importante etapa de toma de decisiones que impactaría en los costos de manufactura al cuantificar las consecuencias ambientales antes de construirse el prototipo objetivo.

Por otro lado, el desarrollo de proyectos que aprovechan las energías del océano alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible impacta de forma positiva al cumplimiento de las metas fijadas hacia el 2030 por las Naciones Unidas. Con proyectos y tecnologías limpias que aprovechan las energías renovables como la energía del océano, no sólo se garantiza la diversificación de la matriz energética, sino también se genera beneficio en la acción por el clima, el acceso a energía asequible y limpia y el cuidado y protección a la vida marina; objetivos de desarrollo sostenible 13, 7 y 14, respectivamente.



Las debilidades detectadas en el desarrollo de esta evaluación ambiental muestran la importancia de generar datos de consulta, ya que las tecnologías del océano al ser relativamente nuevas cuentan con limitada información de componentes y elementos que conforman un prototipo funcional. Incluso se detectó que la base de datos Ecoinvent cuenta con limitada información respecto a tecnologías de energías renovables, lo cual indica lo importante que es el inicio de la documentación de los datos de un proyecto en desarrollo para evitar que sea necesario recurrir a las suposiciones y se genere un error significativo en los resultados finales.

Asimismo, se plantea como una debilidad más el hecho de que una evaluación ambiental, pese a basarse en normas internacionales como las ISO 14040-14044:2006, no es obligatoria para su implementación ni incorporación de mejoras en el diseño que minimicen los impactos ambientales.

Finalmente, las amenazas más grandes para el desarrollo de evaluaciones ambientales de prototipos de tecnologías del océano se encuentran el retiro de fondos para el desarrollo tecnológico y la falta de incentivos para la inversión privada en las tecnologías del océano y todos los avances se queden en la esfera académica, sin lograr la implementación a una escala mayor.

## V. Conclusiones

El análisis de ciclo de vida realizado en esta investigación ha sido un parteaguas para la evaluación ambiental de prototipos de generación eléctrica que aprovechan las energías del océano. Inicialmente se concluye que el estado de desarrollo tecnológico se encuentra en etapas tempranas y la implementación del ACV en tecnologías del océano es de vital importancia para la toma de decisiones en materiales para la reducción de los impactos ambientales.

Este estudio cuantifica un total de 25.05 g de CO<sub>2</sub> equivalente en la categoría de potencial de calentamiento global, de los cuales las principales emisiones se encuentran en la etapa de manufactura con 24.61 g CO<sub>2</sub> equivalente, es decir el 98.24% del total, en donde los principales contribuyentes son los elementos cuya manufactura requieren aleaciones de acero inoxidable 18/8. El proceso de torneado convencional por CNC también es un importante participante en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente con 3.67 g para manufacturar una pieza.

Por otro lado, la operación y mantenimiento generan 0.44 g CO<sub>2</sub> equivalente principalmente por el producto de lubricación en los rodamientos, lo cual corrobora que la operación y el mantenimiento son las etapas con menores impactos en la evaluación ambiental de los prototipos de tecnologías del océano.

Asimismo, es importante recalcar que el prototipo DyLoTTA al ser una turbina de pruebas en laboratorio cuenta con ventajas a nivel de escala real, es decir, se ha detectado que la etapa de manufactura es la principal responsable de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, lo cual a escala real se traducirá en la búsqueda de procesos de manufactura más benéficos en la esfera ambiental sin comprometer el trabajo final de los elementos de la turbina.

Los materiales y la búsqueda de compañías siderúrgicas que empleen tecnologías más limpias en la producción de placas de acero para la manufactura de partes mecánicas son de gran importancia, ya que de esta forma se podrá garantizar que los prototipos se construyen

a base de procesos menos contaminantes y esto representa un área de oportunidad grande para la industria metal mecánica a nivel internacional.

La metodología de investigación y el análisis FODA que este caso de estudio aporta se convierten en un pilar de investigación a futuro para evaluar de forma integral los impactos que generan las tecnologías del océano.

Asimismo, se plantea la importancia del establecimiento de una base de datos sobre prototipos de energías del océano accesible para futuras evaluaciones ambientales que tomen como base la experiencia nacional e internacional para análisis de ciclo de vida futuros.

Esta investigación cumplió con el objetivo general y los objetivos particulares durante el desarrollo de ésta y se concluye que el análisis de ciclo de vida como herramienta de implementación en etapas tempranas de desarrollo tecnológico genera mejores escenarios para toma de decisiones e impulsa al sector académico a continuar en el diseño de prototipos que aprovechan la energía que los océanos y mares ofrecen en México y el mundo.

## VI. Futuras líneas de investigación

Como trabajo futuro se tiene la implementación de la metodología de investigación y análisis FODA para el desarrollo de una evaluación integral para la sostenibilidad de tecnologías del océano.

El análisis de ciclo de vida se convierte en el pilar importante dentro del desarrollo sostenible de tecnologías del océano y la metodología establecida por las normas ISO 14040-14044:2006 se vuelven el eje principal para explorar la evaluación integral de sostenibilidad en las esferas económica y social.

Finalmente, se plantea como futura línea de investigación la incursión en la evaluación ambiental de recubrimientos anticorrosivos para ambientes salinos en donde prototipos a escala se verán expuestos en su continua operación. Así como también, se deja como trabajo futuro el análisis en sitio de instalación el impacto a la flora y fauna por la operación del prototipo DyLoTTA a escala real.

## VII. Referencias

- Ainsworth, D. (2011). *Marine Current Turbine's SeaGen technology*.  
<https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/2011-09-14-4-David-Ainsworth.pdf>
- Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Professional Publishing House.  
<https://books.google.com.mx/books?id=3QdsQgAACAAJ>
- Carabaño, R., Bedoya, C., & Ruiz, D. (2014). *3494-5037-1-Pb*. 66(535).
- Cárdenas, J. R. G. (2007). *Corrientes marinas I*. 3.
- Cardona-Mancilla, C., Del Río, J. S., Chica-Arrieta, E., & Hincapié-Zuluaga, D. (2018). Horizontal axis hydrokinetic turbines: A literature review. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 180–197. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-08>
- CEMIE-OCÉANO. (2017). *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC)*.  
[file:///C:/Users/personal/Desktop/IDAFENCE/CEMIEOceano\\_Gradiente\\_Termico.pdf](file:///C:/Users/personal/Desktop/IDAFENCE/CEMIEOceano_Gradiente_Termico.pdf)
- CEMIE-OCÉANO. (2018). *Energía por Gradientes Salinos*.  
<https://cemieoceano.mx/energia-gradientes-salinos.html>
- Cruz Serrano, N. (2008). *Electricidad a base de oleaje, opción de CFE*. El Universal.  
<https://archivo.eluniversal.com.mx/finanzas/64663.html>
- De la Fuente Melo, C. A. (2017). *Cartera De Necesidades De Innovación Y Desarrollo Tecnológico Energía Del Océano 2017*. 48.
- Energía de los Mares. (2021). *ENERGÍA DE LAS CORRIENTES*.  
<https://energiademar.wordpress.com/energia-de-las-corrientes/>
- Gobierno de la Republica. (2018). *Estrategia Nacional para la puesta en marcha de la Agenda 2030*. *Agenda 2030*.

H. Congreso de la Unión. (2020). Artículo 3 Título (VI). *LEY DE AGUAS NACIONALES Nueva*, 91.

IRENA. (2017). *Ocean energy*. <https://www.irena.org/ocean>

ISO. (2006). *ISO 14044:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>

Mediavilla Briones, J. (2019). *CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA HUELLA AMBIENTAL DE ORGANIZACIÓN DEL CAMPUS DE LEIOA (UPV/EHU)*.

México, N. U. (2016). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>

Mundial, B. (2018). *Energía*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>

Myers, E. P., Hoss, D. E., Peters, D. S., Seki, M. P., Uchida, R. N., Ditmars, J. D., & Paddock, R. A. (1986). The Potential Impact of Ocean Thermal Energy Conversion ( OTEC ) on Fisheries National Oceanic and Atmospheric Administration. *New York, June*, 33.

OES. (2019). *What is Ocean Energy*. <https://www.ocean-energy-systems.org/ocean-energy/what-is-ocean-energy/>

Paredes, M. G., Padilla-Rivera, A., & Güereca, L. P. (2019). Life cycle assessment of ocean energy technologies: A systematic review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/jmse7090322>

Rojas Hernández, J. D. (2016). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD*.

Romero, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, 91–97.

SENER. (2017). *REPORTE DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA ENERGÍA DEL OCÉANO*. 62.

SENER. (2018). *Mapa de ruta tecnológica en energía del océano: Generación de electricidad*.

SENER. (2020). *ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES MÁS LIMPIOS*.  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020)

SIMEC ATLANTIS ENERGY. (2018). *MEYGEN*. <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>

SMN UNAM. (2021). *¿Qué es la Marea?*  
<http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=queEsMarea>

Thinkstep. (2021). *What is GaBi Software*. <http://www.gabi-software.com/mexico/overview/what-is-gabi-software/>

UN. (2015a). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.  
La Asamblea General Adopta La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible.  
[https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#:~:text=View Larger Image-,La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo,el acceso a la justicia.](https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#:~:text=View+Larger+Image-,La+Asamblea+General+adopta+la+Agenda+2030+para+el+Desarrollo,el+acceso+a+la+justicia.)

UN. (2015b). *Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>

Xiros, N. I., & Publishing, S. I. (2018). *Handbook Ocean Engineering*.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0>

## VIII. Anexo

### 1.1.1 Mareas y corrientes

Las mareas consisten en movimientos periódicos del mar, con desplazamiento vertical, de ascenso y descenso de la masa de agua debidos a la atracción entre la Tierra y la Luna, y, en menor medida entre la Tierra y el Sol. Algunos factores que influyen en las mareas son: *la latitud, profundidad del mar y la forma y tipo de costa* (Cárdenas, 2007).

Por otro lado, las corrientes consisten en desplazamientos horizontales o verticales de grandes volúmenes de agua que, en la superficie, no son tan visibles como lo son las olas (Cárdenas, 2007).

Los caudales marinos conforman un sistema complejo con dos tipos de corrientes: *profundas y superficiales*. Las corrientes superficiales son causadas por los vientos y la fuerza de Coriolis, mientras que las profundas son causadas por la diferencia de temperatura entre el agua cálida de la superficie del océano y la fría de las zonas polares, dando origen a la circulación *termohalina*<sup>1</sup> (Cárdenas, 2007).

#### a) Mareas

La marea es una ondulación suave de la superficie del mar, imperceptible a simple vista, que en las cuencas oceánicas gira cíclicamente con períodos de 12.42 horas y/o 24.84 horas, aproximadamente (SMN UNAM, 2021). La marea se manifiesta a lo largo del litoral como la oscilación vertical del promedio de la amplitud del oleaje que llega a la costa.

De acuerdo con el Servicio Mareográfico de la UNAM, la marea es el resultado de las fuerzas gravitacionales e inerciales que actúan sobre cada porción del océano. El campo de fuerza gravitacional de la Tierra y el efecto gravitacional de los cuerpos celestes, tales como la Luna y el Sol, son efectos que el océano siente. Asimismo, se suman las fuerzas inerciales debidas

---

<sup>1</sup> Término de origen griego que significa *thermos*: caliente y *alinos*: salino.



a los movimientos de rotación de la Tierra - Luna y Tierra - Sol. De esta manera, cada porción del océano se encuentra sujeta a fuerzas que nunca están en equilibrio.

La suma vectorial de todas las fuerzas genera la marea.

Cuando la marea alcanza su mayor altura, se denomina *pleamar* y la *bajamar* se refiere a cuando la marea llega a su nivel mínimo. El término *amplitud de marea* se refiere a la distancia vertical entre pleamar y bajamar.

En la Ilustración 1 se muestra un mapa que presenta el potencial de mareas en el mundo determinado a través de altimetría satelital. Los rangos de marea máximos se asocian a los lugares cerca de las costas, particularmente a lo largo de la costa noroeste de Europa; las costas noreste y noroestes de América del Norte, la costa este de África, la costa noroeste de Australia, las costas sur y este de algunas partes del Asia y partes del sur de América. Los autores Charlier y Justus estiman que el potencial de mareas del mundo es aproximadamente de 3 TW, de los cuales alrededor de 1 TW está disponible en aguas poco profundas (Xiros & Publishing, 2018).

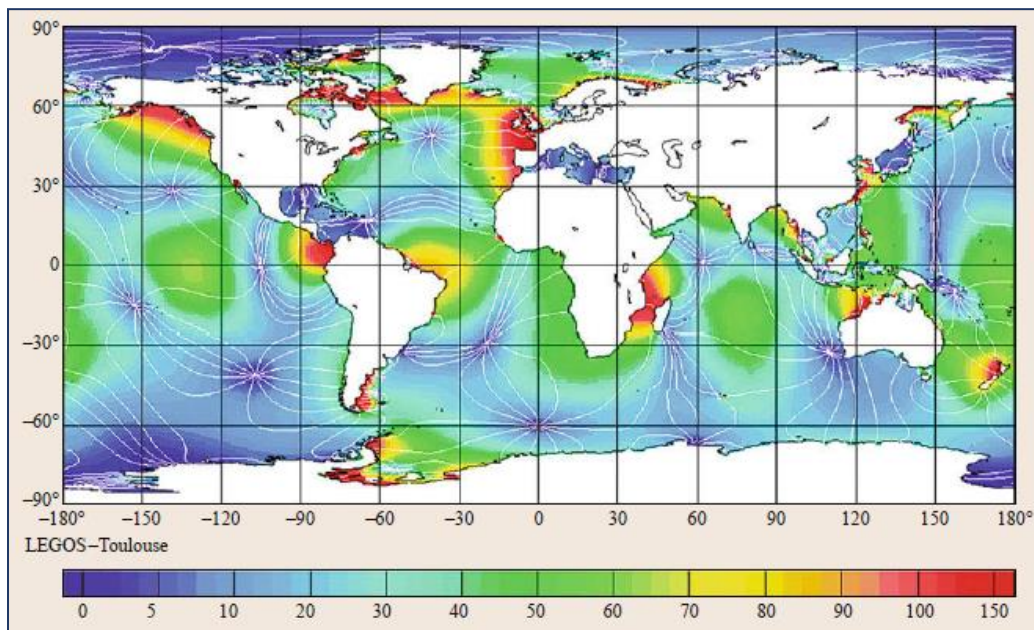


Ilustración 1. Mapa de potencial de las mareas a nivel mundial, ( Xiros & Publishing, 2018).

En México, las costas de San Felipe, Baja California llega a presentar amplitudes máximas de marea de varios metros, mientras que en Cozumel las amplitudes máximas llegan a cuantificarse en centímetros.

Los tipos de marea son: *diurna*, *mixta* y *semidiurna*. De acuerdo con los rangos observados en mareógrafos, en el norte del Golfo de California se encuentra una amplificación del orden de 3.5 m. El Pacífico mexicano logra a registrar rangos de 50 a 120 centímetros, mientras que en el Mar Caribe se observa un rango mínimo de 5 centímetros y en el Golfo de México de 30 a 40 centímetros.

En la Ilustración 2 se presenta un mapa de rangos de marea correspondiente a México. Dicha Ilustración permite visualizar las alturas que son registradas por los mareógrafos en los distintos puntos de las costas del país. La escala se encuentra especificada en centímetros, lo cual permite identificar que el Golfo de California posee los rangos de amplitudes más altos en México.



*Ilustración 2. Mapa de rangos de mareas en México (SMN, 2021).*

### a.1) Tecnologías de aprovechamiento de las mareas

El aprovechamiento de la energía de las mareas tiene una estrecha relación con las tecnologías utilizadas en la energía eólica e hidroeléctrica.

La energía potencial de las mareas cuando se producen los efectos de pleamar y bajamar es capturada mediante presas o diques, tal como funciona una central hidroeléctrica. Con esto, el agua capturada durante el fenómeno de pleamar es liberada durante bajamar y esto impulsa una turbina que, a su vez, genera la energía eléctrica. Sin embargo, la energía potencial asociada a la diferencia de alturas entre la marea alta y la marea baja propicia que sean pocos aquellos diques de mareas en operación para explotación comercial. Por otro lado, las tecnologías de aprovechamiento de mareas son aquellas que tienen un mayor desarrollo en comparación con otras energías del océano.

En la Ilustración 3 se presenta la central eléctrica mareomotriz que se encuentra instalada en Sihwa Lake, Corea del Sur. Comenzó a operar desde el año 2011 y actualmente es la central mareomotriz más grande del mundo con 10 turbinas instaladas, generando 552.7 GWh/año. Con la energía producida por la central eléctrica se puede abastecer a 500,000 habitantes para sus actividades domésticas.



*Ilustración 3. Central mareomotriz de Sihwa Lake, Corea del Sur, con 254 MW de generación eléctrica, (Recurso electrónico, 2020).*

## **b) Corrientes marinas**

Este tipo de energía se encuentra presente en forma de energía cinética generada por el movimiento de las masas oceánicas. Su origen puede ser originado por: los movimientos de rotación y traslación de la Tierra, vientos planetarios, gradientes de presión y el desplazamiento ascendente de aguas marinas, los cuales se conectan a través de todo el planeta.

Las corrientes marinas influyen altamente en el clima de las regiones, la vida marina y en el ciclo del agua. Existen corrientes cálidas, las cuales son aquellas masas de agua superficial que se originan en los océanos de la zona intertropical, es decir, en la franja que se ubica entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, y que va desde las costas orientales de los continentes hacia las latitudes medias y altas en el hemisferio norte. Por otro lado, existen corrientes frías, aquellas cuya temperatura es baja y se encuentran a gran profundidad. Las corrientes frías van desde la zona intertropical y compensan el efecto de las corrientes cálidas cuando alcanzan las costas occidentales de los continentes.

El desplazamiento de las corrientes marinas en el planeta permite tener climas estables en determinadas regiones: climas secos en costas occidentales de la zona intertropical y climas cálidos y húmedos en las costas occidentales de los continentes en las latitudes medias y altas.

En la Ilustración 4 se presenta un mapa de corrientes marinas en el mundo, las flechas rojas indican aquellas que son corrientes cálidas, mientras que las azules hacen referencia a las corrientes frías.

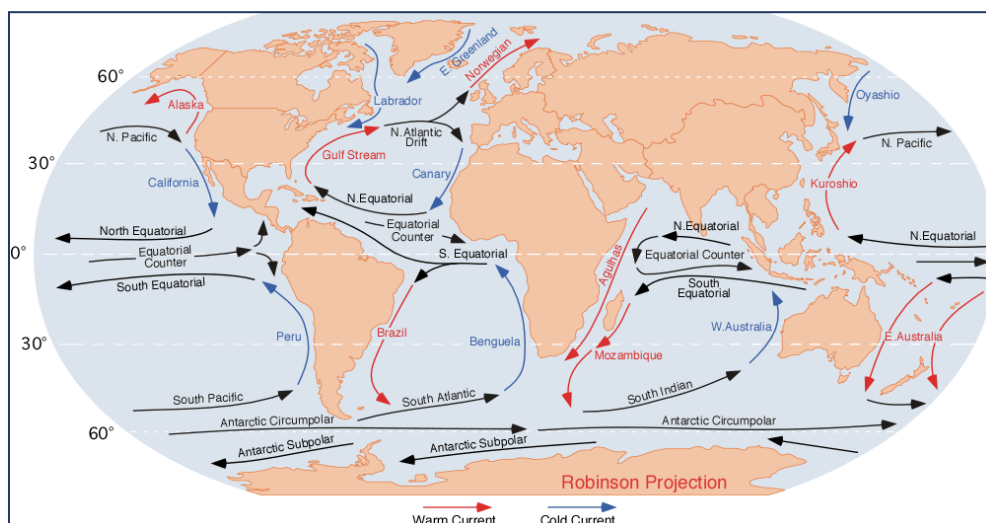


Ilustración 4. Mapa de corrientes marinas en el mundo, (Xiros & Publishing, 2018).

### b.1) Tipos de corrientes marinas

- **Corrientes oceánicas.** Presentan movimientos constantes por la rotación de la Tierra, en sentido este-oeste en la zona intertropical, o en sentido inverso en las latitudes medias o altas.
- **Corrientes de marea.** Son corrientes periódicas de ciclo diario que produce el fenómeno de atracción de la Luna y el Sol sobre la superficie de las aguas. Estas corrientes desplazan enormes masas de agua del hemisferio norte al sur y viceversa.
- **Corrientes de oleaje.** Son corrientes producidas por los vientos, particularmente por fenómenos meteorológico. Ocurren en la superficie de las aguas y su impacto es limitado.
- **Corrientes de deriva litoral.** Estas corrientes son ocasionadas debido al encuentro de las corrientes con el relieve de las costas, lo cual las obliga a cambiar su dirección.
- **Corrientes de densidad.** Son aquellas que se originan en la zona de contacto entre dos masas de agua con diferente densidad, como lo es el caso de las masas más y menos salinas o más y menos cálidas. Estas corrientes se forman en estrechos, mares y océanos o a lo largo del círculo polar ártico.

### b.3 Tecnologías de aprovechamiento de las corrientes marinas

El aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas se enfoca en el empleo de generadores posicionados en medio del flujo. Los generadores pueden ser de tres tipos: rotores de flujo axial, rotores de eje vertical y alerones. Uno de los generadores más estudiados es el de eje axial.

El rotor de flujo axial tiene su eje horizontal y en la misma dirección del flujo. Estos rotores son muy parecidos a los aerogeneradores.

Los prototipos de aprovechamiento de energía de las corrientes marinas han evolucionado debido al avance científico y tecnológico en las últimas décadas.

Durante 1994 y 1995 se probó en Loch Linnhe, Scotland la primera turbina que aprovechaba las corrientes marinas en el mundo (Ver Ilustración 5). El prototipo *Tidal Current Turbine* tenía la capacidad de generar 15kW (Ainsworth, 2011).



Ilustración 5. Prototipo Tidal Current Turbine 15 kW (Ainsworth, 2011).

Este es el primer antecedente registrado de un prototipo de generación eléctrica con energía de las corrientes marinas. Posteriormente, en el año 2003 se instaló el sistema *SeaFlow* cuya generación eléctrica era de 300 kW con velocidades de corrientes marinas de 2.5 m/s (Ver Ilustración 6). El diámetro del rotor del sistema SeaFlow era de 11 m, lo cual lo hacía ser el primer sistema full-size en el mundo en su tipo con corrientes off-shore (Ainsworth, 2011).



Ilustración 6. Prototipo Seaflow 300 kW en sitio, (Ainsworth, 2011).

Posteriormente, el desarrollo del sistema **SeaGen** lo convirtió en la primera turbina marina comercial, cuya capacidad de generación eléctrica aprovechando las mareas y corrientes marinas fue de 1.2 MW. El prototipo se instaló en abril del 2008 en Strangford Narrows, Northern Ireland, Reino Unido y fue desinstalada en julio de 2019.

El sistema SeaGen fue desarrollado por *Marine Current Turbines*, quien realizó pruebas previamente con el prototipo SeaFlow. Sin embargo, el prototipo SeaFlow no se conectó a la red eléctrica nacional, mientras que SeaGen se conectó a la red en julio de 2008, unos meses después de su instalación.

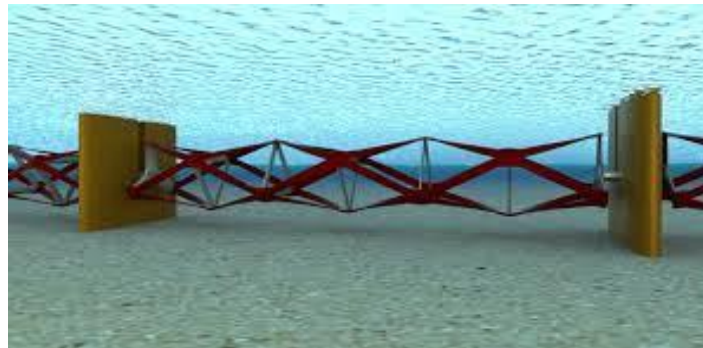
El peso total del sistema SeaGen fue de 300 toneladas. Una de las características importantes del sistema es que las turbinas habían sido patentadas con un rotor que gira 180°, permitiendo la operación en dos direcciones de flujo (Ver Ilustración 7).



Ilustración 7. Prototipo SeaGen, (Ainsworth, 2011).

Otros sistemas de generación eléctrica con energía de las corrientes marinas son los siguientes:

- Sistema THAWT. Este generador es un prototipo es un sistema de turbinas que se coloca en el lecho marino conformado por módulos de 60 m de largo cada uno. Cada módulo está formado por paletas horizontales cilíndricas de 10 m de diámetro cuyo diseño permite aprovechar la corriente en un ángulo más amplio (Ver Ilustración 8) (Energía de los Mares, 2021).



*Ilustración 8. Concepto del prototipo THAWT, (Energía de los Mares, 2021).*

- Sistema Lanstrom. Son turbinas que se colocan en el lecho marino que giran gracias a la acción de las corrientes. Estas tienen una altura de 30 m y tienen una hélice de tres palas de un diámetro de 100 m. (Ver Ilustración 9) (Energía de los Mares, 2021).

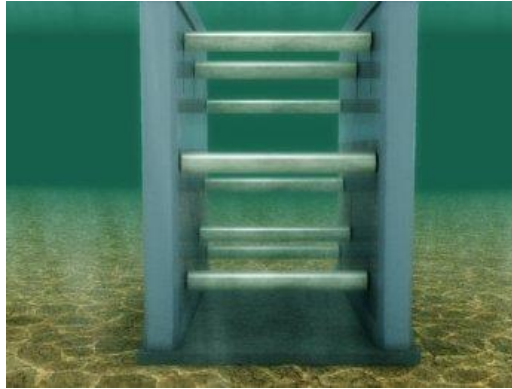


*Ilustración 9. Concepto del prototipo Lanstrom, (Energía de los Mares, 2021).*

- Sistema Vivace. Es un sistema idóneo para instalarse en lechos de ríos, debido a sus reducidas dimensiones, la posibilidad de ubicar sus módulos de acuerdo con las



características del terreno y su funcionamiento con bajas velocidades de corriente. Su principio de funcionamiento consiste en el movimiento vertical de sus cilindros generado gracias a la turbulencia cuando el agua pasa a través de ellos, alimentando a unos generadores ubicados en las guías de estos (Ver Ilustración 10).



*Ilustración 10. Concepto del prototipo Vivace, (Energía de los Mares, 2021).*

### **1.1.2 Energía térmica del océano**

Los océanos son grandes colectores de energía solar, los cuales retienen aproximadamente el 15% de energía solar en forma de energía térmica. La energía térmica del océano es aquella que aprovecha la diferencia de temperatura entre el agua cálida de la superficie y el agua fría de las profundidades del océano, en un rango de los 800 a 1000 metros de profundidad (CEMIE-OCÉANO, 2017).

En Ilustración 11 se presenta la variación de la temperatura a diferentes profundidades de los océanos.

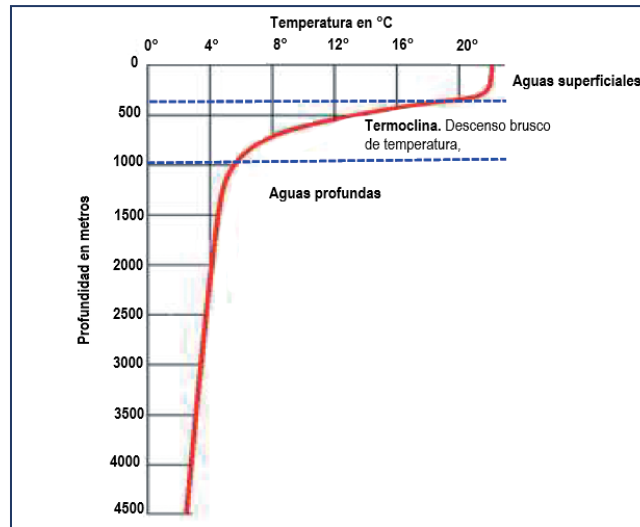


Ilustración 11. Variación de temperatura con la profundidad del océano (Adaptación CEMIE-OCÉANO, 2017),

En la Ilustración 12 se muestra un mapa que presenta el potencial de energía térmica del océano que es aprovechable en el mundo.

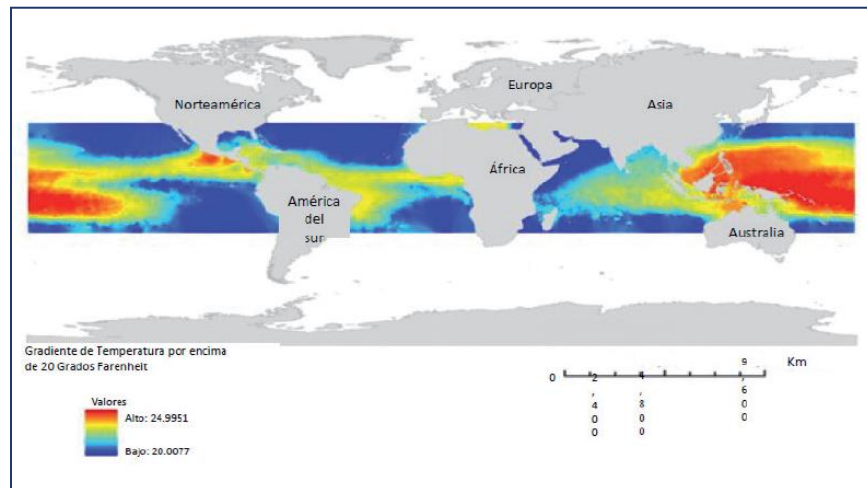


Ilustración 12. Distribución de los gradientes de temperatura del océano (CEMIE-OCÉANO, 2017).

## Tecnologías de aprovechamiento de gradientes térmicos

Las plantas de generación eléctrica que aprovechan la energía térmica son conocidas como plantas OTEC, por las siglas en inglés *Ocean Thermal Energy Converter*. El aprovechamiento de este tipo de energía térmica se puede realizar a través de tres ciclos de conversión (CEMIE-OCÉANO, 2017):

1. **Ciclo abierto.** Aproximadamente el 0.5% del agua caliente de la superficie del mar se evapora en una cámara de vacío. El vapor generado es el fluido de trabajo, el cual pasa a través de una turbina de generación de energía, para después ser condensado por agua fría que proviene del fondo del océano (Ver Ilustración 13).
2. **Ciclo cerrado.** El calor del agua que se encuentra en la superficie del mar se transporta a un fluido de trabajo cuyo punto de ebullición es menor al del agua, algún fluido orgánico que comúnmente es amoníaco, para ser evaporado e impulsar una turbina. Finalmente, el agua fría del océano pasa por un intercambiador de calor que funciona como condensador y el vapor exhausto del fluido de trabajo se vuelve líquido para comenzar el ciclo nuevamente (Ver Ilustración 14).
3. **Ciclo híbrido.** Es una combinación de los ciclos abierto y cerrado (Ver Ilustración 15).

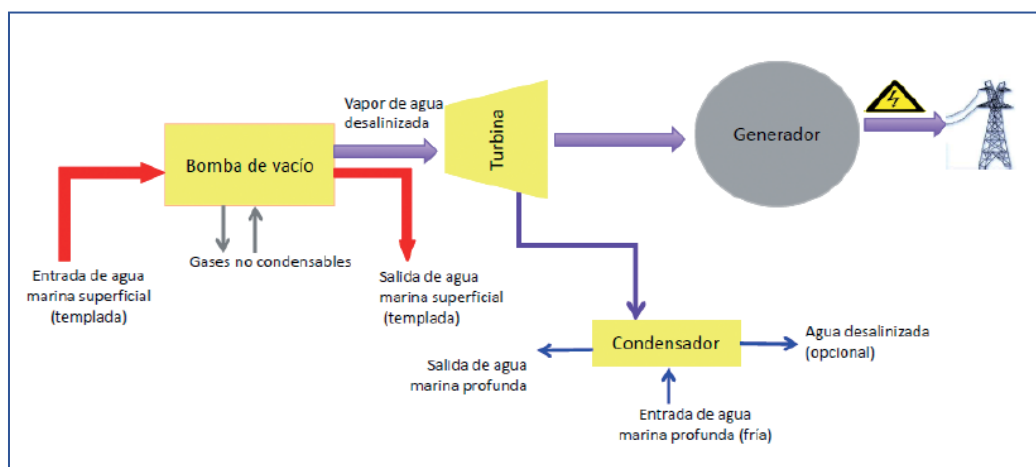


Ilustración 13. Ciclo abierto de una planta OTEC, (CEMIE-OCÉANO, 2017).

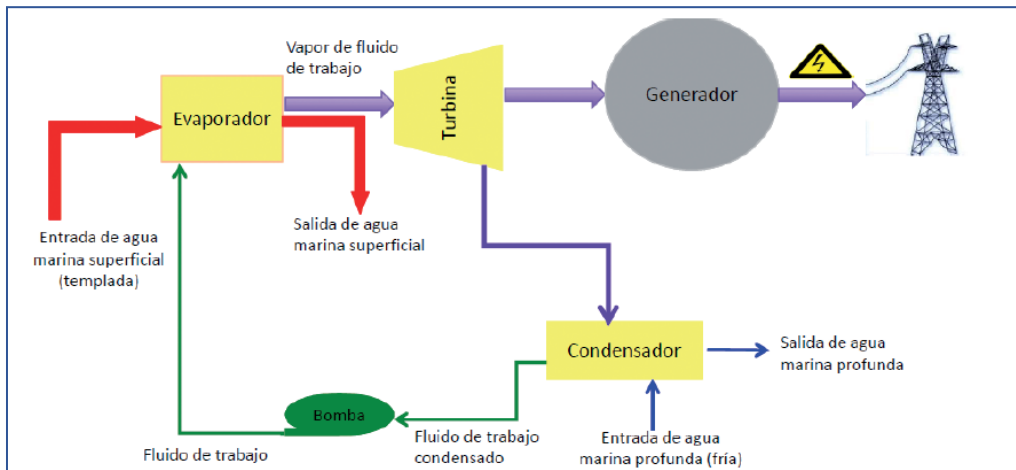


Ilustración 14. Ciclo cerrado de una planta OTEC, (CEMIE-OCÉANO, 2017).

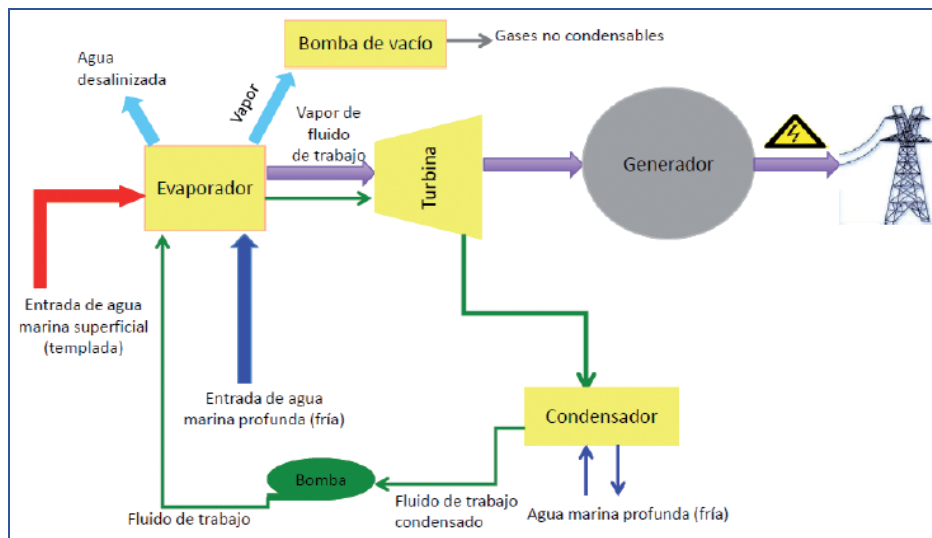


Ilustración 15. Ciclo híbrido de una planta OTEC, (CEMIE-OCÉANO, 2017).

Las plantas OTEC pueden instalarse de dos formas: sobre la costa (*On-Shore*) y fuera de la costa o sistemas flotantes (*Off-Shore*). Las plantas sobre la costa se encuentran a una distancia cercana de ésta, minimizando las probabilidades de sufrir daños por desastres naturales. Debido a su ubicación, las plantas sobre la costa requieren una infraestructura que contemple tuberías muy largas para transportar el agua cálida de la superficie del océano y el agua fría proveniente de grandes profundidades. Esto ocasiona que los costos de una construcción sobre la costa sean muy elevados. Sin embargo, las plantas sobre la costa tienen

mantenimientos más sencillos y no se requieren largos cables para transportar la energía eléctrica generada.

Las plantas fuera de la costa se encuentran a pocos kilómetros de la costa y están construidos sobre plataformas tipo petroleras que pueden llevar anclaje marino o estar flotando. La ventaja de estas plantas se presenta en la distancia para bombear agua de las profundidades que es más corta. Sin embargo, estas instalaciones requieren largos cables submarinos para transportar la energía eléctrica generada y los materiales deben ser más resistentes a la corrosión por encontrarse directamente en un ambiente salino, lo cual se ve reflejado en los altos costos de una instalación fuera de la costa.

Como se mencionó anteriormente, uno de los fluidos más empleados para las plantas OTEC de tipo cerrado es el amoníaco, cuyo estado es gaseado a una temperatura de 20°C. Sin embargo, hay otros fluidos que son empleados y se presentan en la Tabla 1. Es importante destacar que, pese a que llegan a representar un peligro para los seres humanos por su toxicidad, al ser fluidos de trabajo de ciclo cerrado no representan un peligro para los seres vivos ya que son manejados con la seguridad adecuada, siguiendo las normas correspondientes para garantizar la operación correcta de las plantas OTEC.

<b>Fluido</b>	<b>Estado a 20°C</b>	<b>Inflamabilidad en °C</b>	<b>Límite de exposición en ppm</b>	<b>Toxicidad humana</b>
Amoníaco	Gas	671	50	Alta
Freón (R22)	Gas	632	-	Baja
Freón (R11)	Líquido	-	-	Baja
Clorometano	Gas	632	100	Moderada
Cloruro de metileno	Líquido	615	500	Moderada
Dióxido de Nitrógeno	Gas	-	5	Alta

Formiato de metilo	Líquido	465	100	Moderada
Metilamina	Gas	430	10	Alta
Etilamina	Líquido	385	10	Alta

Tabla 1. Fluidos de trabajo para ciclos OTEC (Myers et al., 1986).

### 1.1.3 Gradiente salino

La energía por gradiente salino se basa en la generación de energía eléctrica a partir de una diferencia de concentración salina entre agua marina y agua dulce. El uso de los gradientes salinos para la generación eléctrica tiene sus orígenes en el año 1970 y desde entonces, los avances en el aprovechamiento de esta energía del océano han sido lentos.

Es importante destacar que la ventaja que tiene este recurso es que se encuentra disponible en todo el mundo.

#### Tecnologías de aprovechamiento de gradientes salinos

El uso de membranas para el aprovechamiento de la energía por gradientes salinos está en fase de desarrollo y existen dos métodos prácticos cuyo propósito es aprovechar la potencia osmótica debida a la diferencia de concentración de sales.

- Método de ósmosis por presión retardada (OPR). Este método consiste en poner en contacto dos fluidos de diferente contenido salino y entre los que se coloca una membrana semipermeable que permite el paso del agua, pero no de las sales. El agua dulce fluye a través de la membrana hacia una cámara que contiene el agua salada incrementando la presión en ella y la cual puede ser empleada para impulsar una turbina y generar así la electricidad.
- Método por electrodiálisis inversa (EDI). En el método de electrodiálisis, el agua fluye entre membranas catiónicas y aniónicas (membranas ion-selectivas) colocadas de forma alternada a modo de batería o acumulador. Los aniones Cl<sup>-</sup> de la sal sólo pueden pasar a través de la

membrana de intercambio de aniones, mientras que los cationes  $\text{Na}^+$  sólo a través de la membrana de intercambio de cationes. Como resultado surge un voltaje por la diferencia de cargas positivas y negativas similar a una batería de la cual puede ser generada corriente eléctrica.

En los métodos antes mencionados, la eficiencia de la membrana es importante ya que se requiere de membranas selectivas, de baja resistencia eléctrica, resistente a contaminantes y a su acumulación. En el estado actual del conocimiento, lograr todas las cualidades requeridas para las membranas resulta en un costo elevado de las mismas. Al momento, una planta piloto funciona en Tofte, Noruega desde 2009 (4 kW, tecnología PRO) y en Harlingen, Holanda en 2005 (50 kW, tecnología RED).

Otro tipo de tecnologías que aprovechan los gradientes salinos es el de generadores hidrocráticos que no utilizan membranas:

Este tipo de generador consiste en:

i) un tubo perforado montado sobre el lecho marino en el que se introduce el agua salada, ii) una turbina de eje vertical se coloca en un extremo del tubo perforado; iii) se inyecta agua dulce en dirección de la turbina y iv) la mezcla de agua dulce con agua salada resulta en un flujo con una energía mayor a la requerida para la inyección del agua dulce. El incremento de energía se debe al efecto de pseudo-ósmosis ocurrido durante la mezcla de aguas con diferentes salinidades (CEMIE-OCÉANO, 2018).

#### **1.1.4 Olas**

La energía de las olas es aquella que permite la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del movimiento de la superficie del océano. Los convertidores de energía del oleaje CEO, o WEC por sus siglas en inglés Wave Energy Converter, son variados y aprovechan el cambio de la superficie del mar para mover componentes que son conectados a generadores eléctrico.

El oleaje tiene dos componentes: el viento que sopla de manera local durante un tiempo específico sobre una región y el oleaje lejano que se produce en otro sitio. Para ambos componentes es necesaria la presencia del viento.

Actualmente, la energía de las olas, o también llamada energía undimotriz, es una de las energías renovables más estudiadas para obtener prototipos cada vez más eficientes.

Algunos autores explican que la energía de las olas es la suma de la energía cinética y potencial, la cual convierte en esta energía una gran opción, ya que se encuentra presente en todo el mundo.

Hasta el año 2017, se documentaba un potencial de energía a nivel mundial de 2000 TWh/año. Estableciendo que las zonas con un rango de potencial entre 20 y kW/m eran los sitios más recomendables para el aprovechamiento de este recurso.

La Ilustración 16 presenta un mapa mundial con el potencial de energía de las olas evaluado en las costas. Las unidades de los valores presentados están en kW/m.



Ilustración 16. Potencial de energía de las olas a nivel mundial por unidad de longitud (kW/m), (SENER, 2017).



## Tecnologías de aprovechamiento de las olas

Un sistema de conversión de energía de olas debe ser diseñado de modo óptimo de acuerdo con las características del oleaje predominante (las olas tienen una amplitud, periodo, fase y dirección irregular). Actualmente, se cuenta con prototipos desarrollados en tamaño real y se han estado probando en sitio, sin embargo, los resultados no han sido del todo exitosos por lo que la tecnología se considera en etapa de desarrollo con muchos temas todavía no resueltos (De la Fuente Melo, 2017).

## Referencias de Anexo

- Ainsworth, D. (2011). *Marine Current Turbine's SeaGen technology*.  
<https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/2011-09-14-4-David-Ainsworth.pdf>
- Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Professional Publishing House.  
<https://books.google.com.mx/books?id=3QdsQgAACAAJ>
- Carabaño, R., Bedoya, C., & Ruiz, D. (2014). 3494-5037-1-Pb. 66(535).
- Cárdenas, J. R. G. (2007). *Corrientes marinas I*. 3.
- Cardona-Mancilla, C., Del Río, J. S., Chica-Arrieta, E., & Hincapié-Zuluaga, D. (2018). Horizontal axis hydrokinetic turbines: A literature review. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 180–197. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-08>
- CEMIE-OCÉANO. (2017). *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC)*.  
file:///C:/Users/personal/Desktop/IDAFENCE/CEMIEOceano\_Gradiente\_Termico.pdf
- CEMIE-OCÉANO. (2018). *Energía por Gradientes Salinos*. <https://cemieoceano.mx/energia-gradientes-salinos.html>
- Cruz Serrano, N. (2008). *Electricidad a base de oleaje, opción de CFE*. El Universal.  
<https://archivo.eluniversal.com.mx/finanzas/64663.html>
- De la Fuente Melo, C. A. (2017). *Cartera De Necesidades De Innovación Y Desarrollo Tecnológico Energía Del Océano 2017*. 48.
- Energía de los Mares. (2021). *ENERGÍA DE LAS CORRIENTES*.  
<https://energiademar.wordpress.com/energia-de-las-corrientes/>
- Gobierno de la Republica. (2018). Estrategia Nacional para la puesta en marcha de la Agenda 2030. *Agenda 2030*.
- H. Congreso de la Unión. (2020). Artículo 3 Título (VI). *LEY DE AGUAS NACIONALES Nueva*, 91.

- IRENA. (2017). *Ocean energy*. <https://www.irena.org/ocean>
- ISO. (2006). *ISO 14044:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Mediavilla Briones, J. (2019). *CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA HUELLA AMBIENTAL DE ORGANIZACIÓN DEL CAMPUS DE LEIOA (UPV/EHU)*.
- México, N. U. (2016). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>
- Mundial, B. (2018). *Energía*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Myers, E. P., Hoss, D. E., Peters, D. S., Seki, M. P., Uchida, R. N., Ditmars, J. D., & Paddock, R. A. (1986). The Potential Impact of Ocean Thermal Energy Conversion ( OTEC ) on Fisheries National Oceanic and Atmospheric Administration. *New York, June*, 33.
- OES. (2019). *What is Ocean Energy*. <https://www.ocean-energy-systems.org/ocean-energy/what-is-ocean-energy/>
- Paredes, M. G., Padilla-Rivera, A., & Güereca, L. P. (2019). Life cycle assessment of ocean energy technologies: A systematic review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/jmse7090322>
- Rojas Hernández, J. D. (2016). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD*.
- Romero, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, 91–97.
- SENER. (2017). *REPORTE DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA ENERGÍA DEL OCÉANO*. 62.
- SENER. (2018). *Mapa de ruta tecnológica en energía del océano: Generación de electricidad*.
- SENER. (2020). *ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES MÁS LIMPIOS*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020)
- SIMEC ATLANTIS ENERGY. (2018). *MEYGEN*. <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>

- SMN UNAM. (2021). *¿Qué es la Marea?*  
<http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=queEsMarea>
- Thinkstep. (2021). *What is GaBi Software.* <http://www.gabi-software.com/mexico/overview/what-is-gabi-software/>
- UN. (2015a). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.* La Asamblea General Adopta La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible.  
[https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#:~:text=View Larger Image-,La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo,el acceso a la justicia.](https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#:~:text=View+Larger+Image-,La+Asamblea+General+adopta+la+Agenda+2030+para+el+Desarrollo,el+acceso+a+la+justicia.)
- UN. (2015b). *Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>
- Xiros, N. I., & Publishing, S. I. (2018). *Handbook Ocean Engineering.*  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0>